

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

IZRADA I KARAKTERIZACIJA POLIMERNIH
KOMPOZITNIH MATERIJALA OJAČANIH TKANIM
LANENIM I STAKLENIM OJAČALIMA

LIDIJA KONJEVOD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

Zavod za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila

DIPLOMSKI RAD

IZRADA I KARAKTERIZACIJA POLIMERNIH KOMPOZITNIH MATERIJALA OJAČANIH TKANIM LANENIM I STAKLENIM OJAČALIMA

Izv. prof. dr. sc. Antoneta Tomljenović

Lidija Konjevod, 10749/TTI-TKME

Zagreb, rujan 2018.

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Zagrebu

Tekstilno-tehnološki fakultet

Sveučilišni diplomski studij: Tekstilna tehnologija i inženjerstvo

Smjer: Tekstilna kemija, materijali i ekologija

Student: Lidija Konjevod

Matični broj (broj indeksa): 10749/TTI-TKME

Mentorica: izv. prof. dr. sc. Antoneta Tomljenović

Zavodi na kojima je izrađen diplomski rad:

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

-Zavod za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

-Zavod za materijale

Broj stranica: 89

Broj tablica: 53

Broj slika: 52

Broj literaturnih izvora: 38

Članovi povjerenstva:

Prof. dr. sc. Budimir Mijović, predsjednik

Izv. prof. dr. sc. Antoneta Tomljenović, članica

Doc. dr. sc. Ružica Brunšek, članica

Doc. dr. sc. Maja Somagyi Škoc, zamjenik člana

Datum predaje rada:

Datum obrane rada:

Zahvala

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Antoneti Tomljenović koja je svojim znanstvenim i stručnim savjetima, ali i domišljatim i kreativnim rješenjima sudjelovala u izradi ovog rada.

Zahvaljujem se i djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, posebno izv.prof.dr.sc. Tatjani Haramina, izv.prof.dr.sc. Željku Alaru, asistentu mag. ing. Danielu Purgaru i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na raspoloživosti, te uloženom trudu i vremenu pri izradi rada.

SAŽETAK

Vlasknima ojačani kompoziti su materijali koji se primjenjuju u različite svrhe, a koriste se zbog poboljšanih svojstava koja se ne mogu dobiti samo jednom komponentom nego se dobivaju kombinacijom više materijala. U novije vrijeme upotreba prirodnih vlakana kao zamjena za sintetska ojačala (npr. staklena, ugljikova ili aramidna vlakna) unutar polimernih kompozita poprima sve veće značenje zbog dobrih svojstava prirodnih vlakana, cijene, ekološke prihvatljivosti i mogućnosti recikliranja. Najčešće se koriste ojačala izrađena od stabljičnih vlakana kao što su lan, konoplja, juta, kenaf i druge. U ovom radu uspoređena su svojstva kompozita izrađenih iz nezasićene poliesterske smole, a ojačanih tkanim ojačalima izrađenim od staklenih i lanenih vlakana, te njihove kombinacije. Uhođan je postupak izrade kompozitnih ploča postupkom ručnog laminiranja u laboratorijskim uvjetima. Provedena je karakterizacija primijenjenih ojačala, utvrđena je debljina izrađenih kompozitnih ploča, maseni i volumni udio vlakana u njima te mehanička svojstva – ispitivanjem vlačne, savojne i međuslojne čvrstoće te tvrdoće. Kroz dobivene rezultate analizirana je mogućnost potpune ili djelomične zamjene staklenih vlakana lanenim u proizvodnji vlasknima ojačanih kompozita. Ova zamjena imala bi značajan doprinos brizi o okolišu jer su lanena vlakna oporabljiva, biorazgradiva, ali i prilično otporna na vlačna opterećenja.

Ključne riječi: vlasknima ojačani kompoziti, ručno laminiranje, staklena i lanena tkana ojačala, ispitivanje materijala

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Vlaknima ojačani kompoziti.....	2
2.1.1. Ojačala.....	5
2.1.1.1. Staklena vlakna.....	6
2.1.1.2. Lanena vlakna.....	8
2.1.2. Matrica.....	9
2.1.3. Izrada vlaknima ojačanih kompozita.....	10
3. METODIKA RADA.....	14
3.1. Temeljni pristup istraživanju.....	14
3.2. Materijali i metode.....	15
3.2.1. Primijenjene pređe.....	15
3.2.2. Karakterizacija ojačala.....	15
3.2.3. Izrada kompozitnih ploča.....	21
3.2.3.1. Ploča S1_I.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1 ...	23
3.2.3.2. Ploča S2_I.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2..	24
3.2.3.2. Ploča S2_I.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2..	25
3.2.3.4. Ploča S1_III.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1.....	26
3.2.3.5. Ploča L1_I.-kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala L1...	27
3.2.3.6. Ploča S1_IV.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1.....	28
3.2.3.7. Ploča S2_II.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2..	29
3.2.3.8. Ploča S1L1_I.- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1.....	30
3.2.3.9. Ploča S1L1_II.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1.....	31
3.2.3.10. Ploča S1_V.- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1.....	33
3.2.3.11. Ploča S2L2- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L2.....	34
3.2.3.12. Ploča S2L3- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog	

ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L3.....	35
3.2.3.13. Ploča S2L1- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L1.....	36
3.2.4. Karakterizacija kompozitnih ploča.....	37
3.2.4.1. Izračun masenog i volumnog udjela vlakana u kompozitnim pločama.....	39
3.2.4.2. Mehanička svojstva kompozitnih materijala.....	41
3.2.4.2.1. Vlačna čvrstoća prema HRN EN ISO 527-4:2008.....	41
3.2.4.2.2. <i>Savojna čvrstoća prema HRN EN ISO 14125:2005/A1:2011.....</i>	43
3.2.4.2.3. <i>Međuslojna smična čvrstoća prema HRN EN ISO 14130:2005.....</i>	45
3.2.4.2.4. <i>Tvrdoća prema HRN EN ISO 2039-1:2005.....</i>	46
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	47
4.1. Rezultati karakterizacije ojačala.....	47
4.2. Rezultati karakterizacije kompozitnih ploča.....	49
4.2.2. Mehanička svojstva.....	51
4.2.2.1. Vlačna čvrstoća.....	51
4.2.2.1.1. <i>Kompozitna ploča S1_IV.</i>	51
4.2.2.1.2. <i>Kompozitna ploča L1_I.</i>	55
4.2.2.1.3. <i>Kompozitna ploča SIL1_I.</i>	58
4.2.2.1.4. <i>Kompozitna ploča SIL1_II.</i>	61
4.2.2.2. Savojna čvrstoća.....	65
4.2.2.2.1. <i>Kompozitna ploča S1_IV.</i>	65
4.2.2.2.2. <i>Kompozitna ploča L1_I.</i>	68
4.2.2.2.3. <i>Kompozitna ploča SIL1_I.</i>	71
4.2.2.2.4. <i>Kompozitna ploča SIL1_II.</i>	74
4.2.2.3. Međuslojna čvrstoća	78
4.2.2.3.1. <i>Kompozitna ploča S1_IV.</i>	78
4.2.2.3.2. <i>Kompozitna ploča L1_I.</i>	79
4.2.2.3.3. <i>Kompozitna ploča SIL1_I.</i>	80
4.2.2.3.4. <i>Kompozitna ploča SIL1_II.</i>	81
4.2.2.4. Tvrdoća.....	82
4.2.2.4.1. <i>Kompozitna ploča L1_I.</i>	83
5. ZAKLJUČAK.....	85
6. LITERATURA.....	86

1. UVOD

Vlaknima ojačani kompoziti su materijali koji se primjenjuju u mnogobrojnim djelatnostima kao što su brodogradnja, građevinarstvo, zrakoplovstvo, automobilska industrija, nautika, a koriste se zbog svojih odličnih svojstava koja se ne mogu dobiti samo jednom komponentom nego se dobivaju kombinacijom više materijala. Mehanička svojstva vlaknima ojačanih kompozita ovise o vrsti i svojstvima komponenti iz kojih su izrađeni- ojačala i matrice, o dizajnu kompozita i adheziji između ojačala i matrice.

U novije vrijeme upotreba prirodnih vlakana kao zamjena za sintetska ojačala (npr. staklena, ugljikova ili aramidna vlakna) unutar kompozita poprima sve veće značenje zbog dobrih svojstava prirodnih vlakana, cijene, ekološke prihvatljivosti i mogućnosti recikliranja. Glavni razlozi razvijanja kompozita ojačanih prirodnim vlaknima je ekološki aspekt koji postaje sve važniji faktor u industriji. Problem recikliranja kompozita jedno je od glavnih ekoloških problema današnjice koji bi se uvođenjem prirodnih vlakana kao ojačala značajno smanjio. Prednost prirodnih vlakana je i u njihovoj relativno maloj gustoći, a dobrim mehaničkim svojstvima. Najčešće se koriste ojačala izrađena od stabljičnih vlakana kao što su lan, konoplja, juta, kenaf i druge. I ako se korištenje biljnih vlakana u ojačavanju kompozita utrostručila u posljednjem desetljeću, kompoziti ojačani biljnim vlaknima čine samo 1,9% europskog tržišta vlaknima ojačanih kompozita. Kao ojačalo se najčešće koristi lan koji čini 64% tog tržišta.

U ovom radu uspoređena su svojstva polimernih kompozita ojačanih tkanim ojačalima izrađenim od staklenih i lanenih vlakana, te njihove kombinacije kako bi kroz dobivene rezultate mogli vidjeti mogu li lanena vlakna u barem jednim dijelom zamijeniti staklena u proizvodnji vlaknima ojačanih kompozita. Ova zamjena imala bi značajan doprinos brizi o okolišu jer su lanena vlakna oporabljiva, biorazgradiva, ali i poprilično otporna na vlačna opterećenja.

2. TEORIJSKI DIO

Kompozitni materijali su sastavljeni iz dvije ili više komponenata (materijala koji su zasebno dobiveni) koje se razlikuju po svome sastavu i/ili obliku, ali su unutar kompozita međusobno nerazvojni i nadopunjavaju se. Elementi kompozita po sastavu mogu biti metali, keramika ili neka vrsta polimera u obliku zrnaca, vlakana ili lamela. Kompoziti su formirani s ciljem postizanja posebne kombinacije svojstava [1].

Neke od glavnih prednosti kompozitnih materijala prema konvencionalnim materijalima su:

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika,
- manji troškovi naknadne obrade,
- dimenzijska stabilnost u teškim radnim uvjetima,
- otpornost na koroziju te
- mogućnost dizajniranja svojstava [2].

Ono što kompozitima daje posebnost je činjenica da često imaju kombinirana svojstva elemenata od kojih su građeni. Na primjer, beton je jeftina i lagana sirovina, no lako puca pod utjecajem djelovanja opterećenja. S druge strane, čelik je čvrst, skup i težak. Ojačavanjem betona metalnim šipkama dobivamo kompozit koji je čvrst, relativno lagan i jeftin.

Neki od najvećih znanstvenika, kao što su Faraday, Poisson, Maxwell, Einstein i Reyleigh doprinijeli su teoriji kompozita. I ako se aktivno izučavaju već duže od 100 godina, eksplozija ideja u zadnjih nekoliko desetljeća (posebno zadnja 2 desetljeća) značajno je povećala naše znanje o vezi između svojstava korištenih materijala i mikrostrukture kompozita i općenito ukupnog utjecaja različitih faktora na ponašanje kompozita.

Teško je predvidjeti budućnost, ali nedvojbeno je da će postati moguće "dizajnirati kompozite" gdje će mikrostrukture biti tako krojene da će kompozit imati željena svojstva. Povezati utjecaj mikrostrukture kompozita na makrostrukturu ključan je čimbenik za napredak na ovom području [3].

2.1. Vlaknima ojačani kompoziti

Vlaknima ojačani kompoziti (VOK) sastoje se od vlakna koja se nalaza unutar matrice ili su vezana na nju, a granica između njih jasno je određena. I vlakna i materica u toj kombinaciji zadržavaju svoj fizički i kemijski integritet, a postižu se svojstva materijala

koja se ne mogu dobiti samo jednom komponentom. Vlakna su u VOK-u ojačala, odnosno element koji nosi opterećenje, dok su glavni zadaci matrice: držati vlakna u željenoj poziciji, prenositi opterećenje i štiti vlakna od vanjskih utjecaja (npr. sunčevog zračenja, visokih temperatura i sl.).

Najčešći oblik VOK-a su laminati, a dobivaju se slaganjem tankih slojeva vlakana i matrice, dok se fizikalna i mehanička svojstva laminata određuju orijentacijom vlakna, brojem i rasporedom slojeva [1].

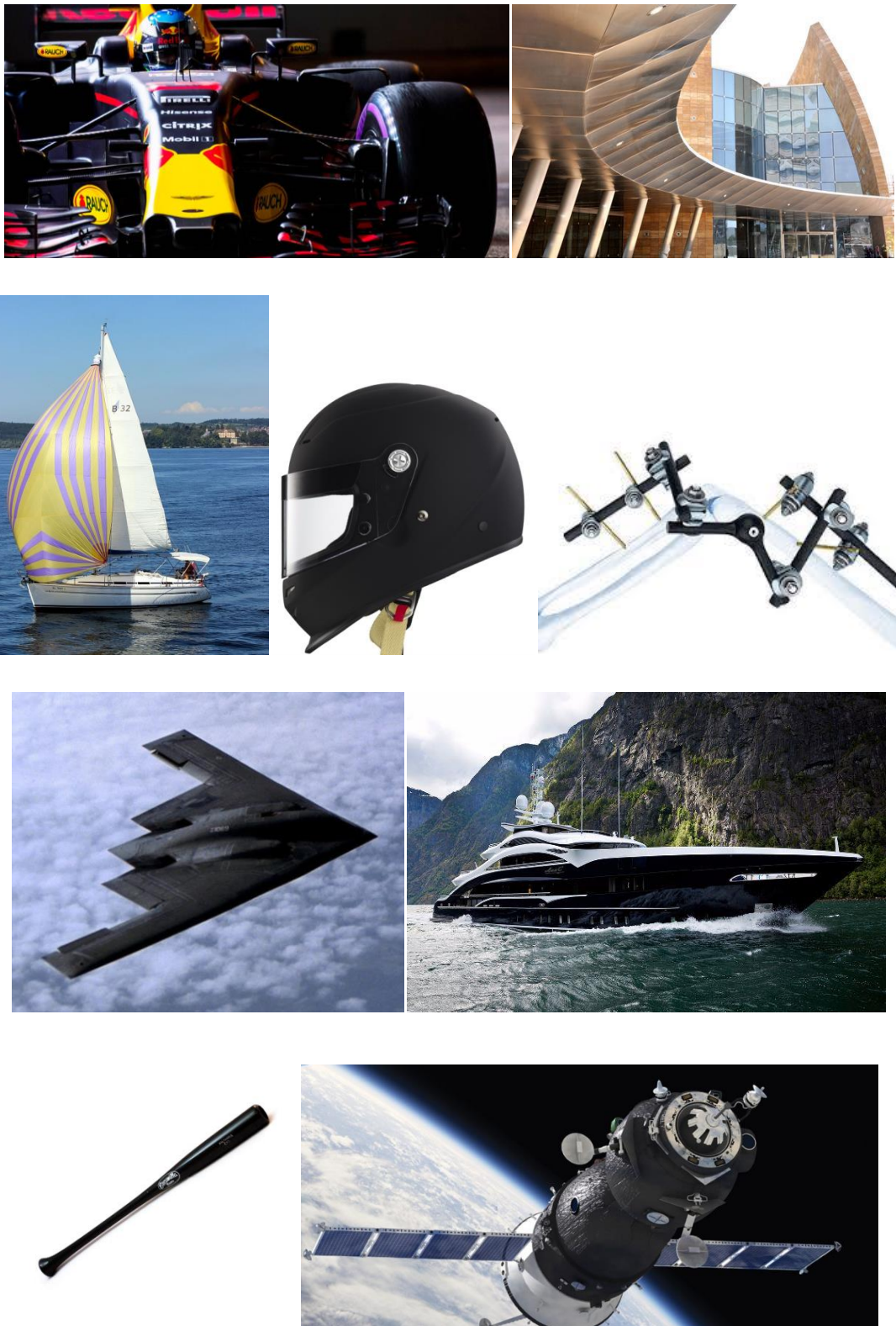
Neke od karakteristika VOK-a su:

- anizotropnost, tj. svojstva su im ovisna o smjeru provođenja mjerenja (ako je VOK ojačan samo u jednome smjeru) [4],
- mehanička svojstva maksimalna u smjeru vlakna,
- električna vodljivost manja od električne vodljivosti metala,
- bolja dimenzijska stabilnost u širem temperaturnom intervalu,
- bolja apsorpcija energije vibracije,
- smanjena transmisija buke i vibracija,
- u pravilu veća trajnost,
- nekorozivnost te
- manja potrošnja energije na proizvodnju [1].

Široka je upotreba VOK-a (sl. 1), a osnovna područja primjene su:

1. Auto industrija- sastavni je dio šasije automobila, motora i bolida zbog otpornosti na udare i smanjene mase, koristi se i za izradu dijelova motora, za unutrašnje dijelove, za zvučnu izolaciju i sl.;
2. Zrakoplovna industrija- koristi se za vojne i civilne zrakoplove prvenstveno radi smanjene mase letjelica, s čim se umanjuje potrošnja goriva i postižu veće brzine.;
3. Svemirska industrija- smanjuju masu i otporni su na toplinu;
4. Nautika- 90% rekreacijskih brodova izrađeno je iz VOK-a, a koristi se radi smanjenja mase, postizanja većih brzina, lakšeg upravljanja plovilom i smanjenja potrošnje goriva;
5. Sport- postiže se fleksibilnost, prigušenje vibracija i smanjuje se masa, a iz VOK-a se izrađuju: skije, hokejaške i bejzbol palice, jedrilice i jedra, reketi, kacige, daske za surfanje, luk i strijele, i dr.;
6. Infrastruktura- koristi se u različitim vrstama građevina (npr. mostovi), a s VOK-om se postiže dulji vijek trajanja i manja cijena održavanja infrastrukture;
7. Medicina- koriste se u raznim granama medicine, npr. stomatologiji ili ortopediji;
8. Elektronika- česta im je primjena za različite elektroničke komponente [5];

9. Namještaj- primjenjuje se za sanitarije, ploče namještaja, podove i sl. [6].



Slika 1. Proizvodi od vlaknima ojačanih kompozita [7-14]

Vlankima ojačani kompoziti sastoje se od ojačala (vlakna),matrice, sredstva za povezivanje, premaza i punila. Sredstva za povezivanje dodaju se kako bi se vlakna što bolje uklopila s matricom, dok se punila i ostali dodaci koriste radi smanjenje cijene, povećanja modula, kontrole viskoznosti, zaglađivanja površine, smanjenja kalupnog skupljanja, i sl. [1].

2.1.1. Ojačala

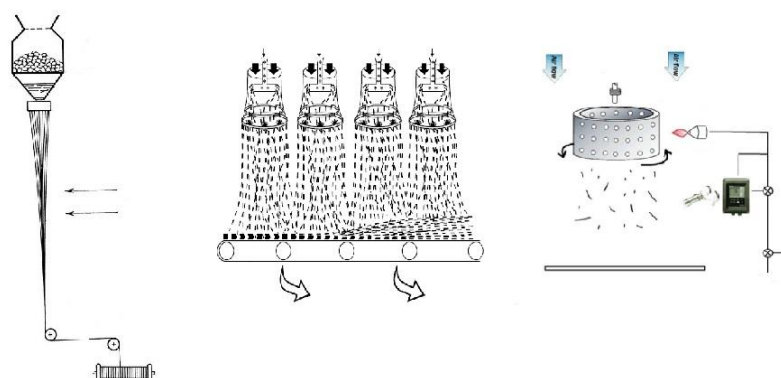
U vlankima ojačanim kompozitima vlakna služe kao ojačala. Vlakno je oblik tvari kod kojeg je poprečni presjek puno manji od duljine. Ta razlika mora biti najmanje 1:100 [15]. Vlakna zauzimaju najveći volumni udio VOK-a i nositelji su glavne opterećenja. Vrsta korištenih vlakana, njihova duljina, volumni udio i orijentacija odredit će svojstva kompozita kao što su gustoća VOK-a, vlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, modul elastičnosti, zamor materijala, tvrdoća, vodljivost i cijena. Najčešće se koriste vlakna visokih mehaničkih svojstava i finoće kao što su ugljikova, aramidna, staklena, politetrafluoretilenska (PTFE) i druga vlakna, a u novije vrijeme i prirodna vlakna [1]. Na današnjem tržištu vlankima ojačanih kompozita, polimerni kompoziti ojačani ojačalima od staklenih vlakana čine 87% globalne proizvodnje vlankima ojačanih kompozita, a gotovo 65% svih vlankima ojačanih kompozita čine oni iz poliesterske matrice ojačane ojačalom od staklenih vlakana. Prirodna vlakna mogu biti odlična alternativa anorganskim staklenim vlankima u ojačavanju kompozita [16]. Prirodna vlakna kao ojačala u kompozitima imaju prednost zbog svoje cijene, specifičnih svojstava, nisu opasna za zdravlje, ekološki su prihvatljiva i imaju dobra mehanička svojstva i ako imaju nižu gustoću. Također, velika je prednost prirodnih ojačala mogućnost uporabe budući da je uporaba veliki problem u industriji kompozitnih materijala. Postoji cijeli niz prirodnih vlakana koja mogu biti korištena za izradu kompozitnih materijala, a najčešće se koriste juta, lan, kenaf, sisal i konoplja [17].I ako se primjena prirodnih stabljičnih vlakana za ojačavanje kompozita u zadnjih 10 godina utrostručila, i dalje tako ojačani kompoziti čine samo 1,9% od 2,4 miliona tona vlankima ojačanih kompozita u Europskoj Uniji [18].

U ovom radu korištena su ojačala izrađena od staklenih i lanenih vlakana pa je u daljnjem tekstu naglasak stavljen na te dvije skupine vlakana.

2.1.1.1. Staklena vlakna

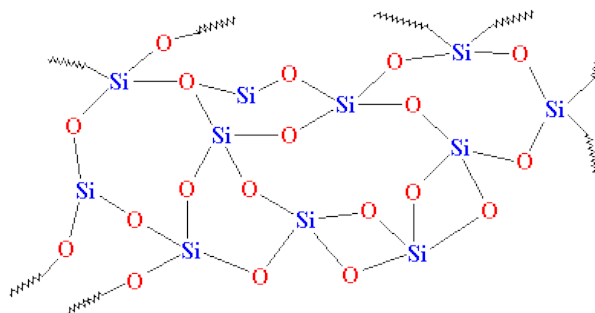
Staklena vlakna (međunarodna kratica prema BISFA-i je GF) su vlakna dobivena postupcima ispredanja različitih vrsta stakla iz taline. Prvi povijesni izvori spominju staklena vlakna u Egiptu u doba oko 1600.p.Kr. gdje su korištena za ukrašavanje staklenih posuda. Prvi patent o promjeni staklenih vlakana za izradu kompozitnih ploča prijavljen je 1935. u Njemačkoj. No prvi kompoziti s ojačalima od staklenih vlakana proizvedeni su u vojne svrhe u SAD-u za vrijeme 2. svjetskog rata.

Proizvodnja staklenih vlakana uključuje najmanje dvije faze: pripremanje stakla odgovarajućeg kemijskog sastava i ispredanje vlakana. Osnovne sirovine za proizvodnju stakla su: kvarcni pijesak (SiO_2), vapnenac koji je uglavnom građen od kalcijevog karbonata (CaCO_3), kolemantit ($\text{Ca}[\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3] \cdot \text{H}_2\text{O}$) ili kaolin ($\text{Al}_2[(\text{OH})_4/\text{Si}_2\text{O}_5]$) te određene vrste oksida ovisno o vrsti stakla koju želite proizvesti. Postoji više vrsta stakla, a udio komponenata u smjesi za određenu vrstu stakla je strogo određen kako bi se dobilo željeno staklo točno određenog sastava. Svaka vrsta stakla ima svoja svojstva, tako npr. razlikujemo D-staklo koje se odlikuje posebnim dielektričnim svojstvima, dok E-staklo posjeduje veliki električni otpor. Vlakna koja se dobivaju mogu biti vlasasta ili filamentna. Postupci dobivanja se ne razlikuju puno i svode se na izvlačenje niti iz rastaljenog stakla. Staklo se zagrijava na temperature 1250 do 1350 °C, dovodi se u mlaznicu oblika kadice i kroz otvore promjera 1 do 2 mm slobodno istječe. Oblikuju se niti koje se izvlače velikom brzinom i hlade zrakom. Filamentna vlakna skrutnjavaju se kontaktnim hlađenjem te prskanjem vodom, a vlasasta zrakom koji ih istovremeno izvlači do potrebne finoće (sl. 2) [15].



Slika 2. Proizvodnja staklenih vlakana: a) filamentna [19]; b) vlasastih vlakana zračnim postupkom [20]; c) vlasastih vlakana centrifugalnim postupkom [21]

Svojstva staklenih vlakana ovise o njihovoj kemijskoj građi i strukturi kao i uvjeti ispredanja (brzina, temperatura, intenzitet hlađenja). Staklena vlakna su kemijski gledano višekomponentni sustavi umreženih tetraedara s atomima aluminijs, bora i silicija u središtu i kisikovim atomima na vrhovima tetraedara kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. molekularna struktura SiO₂stakla [22]

Kada se govori o uporabnim svojstvima valja istaknuti negorivost i veliku termičku otpornost, relativno veliku čvrstoću s obzirom na gustoću, dobra izolacijska svojstva, otpornost na mikroorganizme, dobru otpornost na ulja, masti, organska otapala, kiseline i lužine (u pH području 3 do 9). Osjetljivost na jake lužine, korozija površine, krtoš i teška preradivost nedostaci su staklenih vlakana. Utjecajem na morfološke karakteristike neka se od svojstava mogu modificirati u skladu sa zahtjevima upotrebe.

Staklena vlakna koriste se u raznim područjima primjene, a mogu se podijeliti u 4 skupine:

- tekstilna staklena vlakna- ovaj naziv označava vlakna koja se prerađuju postupcima karakterističnim za tekstilnu preradbu. Obuhvaća filamentna vlakna od kojih se pretežito izrađuje neuvijena multifilamentna pređa za ojačavanje kompozita. Vlasasta tekstilna staklena vlakna dolaze u različitim duljinama i koriste se za izradu predenih pređa za tkanje i pletenje, te netkane tekstilije.
- izolacijska staklena vlakna- uglavnom se koriste vlasasta vlakna koja se prerađuju u netkane tekstilije za toplinsku i elektro-izolaciju.
- staklena mikrovlakna- to su vrlo fina vlasasta vlakna promjera 0,5 do 2,0 μm . Koriste se za specijalne namjene gdje je njihova velika specifična površina svojstvo koje se posebno iskorištava (npr. izrada mikroporozne membrane za kemijsku industriju).

- šuplja staklena vlakna- posjeduju specifične morfološke karakteristike budući da u središnjem dijelu imaju uzdužnu šupljinu koja zauzima do 30% ukupnog volumena vlakna čime se značajno smanjuje masa. U ovu skupinu spadaju optička vlakna koja su građena kao fina bikomponentna vlakna tipa jezgra/omotač i koriste se u optičkim elektrokomunikacijama i nekim specijalnim primjenama (npr. medicinska dijagnostika, svjetlovodi).

Njihova tekstilna promjena svodi se uglavnom na njihovu negorivost pa se od njih izrađuju proizvodi kao što su: zavjese, zastori i zaštitna odjeća. U tehničke svrhe koristi se kao ojačalo različitim materijalima, za membrane, netkane tekstilije, filtre, za izolaciju u građevinarstvu, za elektroindustriju, kao punila, obloge za spremnike, u automobilske industriji i mnoge druge primjene [15].

2.1.1.2. Lanena vlakna

Laneno vlakno je prirodno celulozno vlakno koje je dobiveno iz stabljike lana, jednogodišnje biljke iz roda *Linum* koji obuhvaća 200 vrsta. Za dobivanje vlakana najviše se koristi plavi lan. Laneno vlakno ima složenu morfologiju. Građeno je od primarne, sekundarne i terciarne stjenke, a u središtu se nalazi lumen. Lan se češće koristi u obliku tehničkog vlakna, nego elementarnog. Neki od svojstava lanenih vlakana su:

- duljina vlakna- tehničko vlakno nalazi se u rasponu od 300 do 900 mm, a elementarno ovisi o dijelu biljke iz kojeg potječe i može biti od 4 do 65 mm;
- finoća vlakna- tehničko vlakno je grubo i ima finoću u rasponu od 14 do 40 dtex, dok se za elementarno vlakno finoća kreće od 15 do 22 μm ;
- čvrstoća- prosječna čvrstoća lanenog vlakna iznosi 3-6 cN/dtex, istezljivost mu je slaba. Slabo je savitljiv pa se laneni proizvodi lako gužvaju;
- repriza- vrijednost reprize kreće se od 5 do 20%;
- dugotrajno izlaganje sunčevim zrakama i atmosferskom utjecaju dovodi do starenja lana koji gubi čvrstoću i uporabnu vrijednost;
- lan je djelomično otporan na djelovanje hladnih i razrijeđenih kiselina i lužina.

Zbog razmjerno velike cijene proizvodnje i preradbe i velike konkurencije na tržištu vlakana, lan je godinama bio istisnut s mnogih područja upotrebe, posebno u području tehničkih tekstilija. Ipak, u posljednjem se desetljeću značajno povećalo korištenje

lanenih vlakana. Od lanene se pređe proizvode različiti predmeti tekstilne i ne tekstilne namjene, a svoje mjesto u tehničkom području zauzima ponajviše kod proizvodnje vlaknima ojačanih kompozita [15].

Ojačala od lanenih vlakana za izradu polimernih kompozita mogu biti izrađena samo od lanenih vlakana (eng. dry preforms) ili mogu biti lanena ojačala impregnirana smolom koja se koristi za izradu kompozita (eng. wet preforms). Ojačala od lanenih vlakana mogu biti različitih oblika: kratka vlakna, predene i visokoorijentirane (tzv. roving) pređe (sl. 4), netkana i tkana ojačala (istosmjerno orijentirana ojačala (UD), dvosmjerno orijentirana ojačala (2D) ili višesmjerno orijentirana ojačala) [23].



Slika 4. Visokoorijentirana lanena roving pređa male uvojitosti ili bez uvoja[23]

Za kompozitne ploče u ovom radu korištena su tkana ojačala izrađena iz neuvijene visokoorijentirane roving pređe. Rovnig pređe iz lanenih vlakana su pređe iz paraleliziranih tehničkih vlakana male uvojitosti ili bez uvoja. Pri izradi roving pređe bez uvoja, mokra stabljična vlakna prolaze kroz vruću vodu kako bi se uklanjanjem pektina omekšala, a pređa se oblikuje između valjaka. Ojačala izrađena od ove vrste pređe u usporedbi s ostalim ojačalima imaju veću čvrstoću i savojnu krutost. Tkana ojačala dobivaju se ispreplitanjem niti osnove i potke i mogu se izrađivati u različitim vezovima (platneni, keperni, i dr.). Ojačala korištena u ovom radu izrađena su u platnenom vezu [23-25].

2.1.2. Matrica

Matrica (matriks) zadužen je za držanje vlakana u željenom položaju, raspoređuje naprezanja između vlakana, štiti vlakna od okolnih utjecaja, sprječava degradaciju vlakana i ima malu ulogu u otpornosti na vlačno naprezanje. Matrica može biti:

1. Metal- izrađuju se radi dugotrajnosti i podnošenja visokih temperatura. U odnosu na polimernu matricu ima veću čvrstoću i modul ne može se plastično deformirati, no

imaju visoku gustoću što im može biti nedostatak. Najčešće se koriste: aluminij, titanij, magnezij i berilij

2. Keramika- keramička matrica stabilna je na visokim temperaturama, otporna je na termički šok, visokog modula i tvrdoće, otporna na koroziju i niske gustoće. Ono što je nedostatak iste je krtoš i krhkost te niska otpornost na širenje napuknuća. Koriste se: oksidi (Al_2O_3) i ne-oksidi (SiC , Si_3N_4 , AlN , B_4C) [1].

3. Polimer- najčešći zahtjevi na polimerne matrice su visoka čvrstoća i vlačni modul, visoka žilavost, dimenzijska stabilnost i otpornost na vlagu i kemikalije. Dijele se u dvije skupine:

- Termostabilni polimeri (duromeri)- imaju veliku termičku stabilnost, kemijsku otpornost i nisko pužanje, ali imaju nisku vrijednost istezanja, potrebno je više vremena za izradu i ne mogu se skladištiti dugo.

- Termoplastični polimeri (plastomeri)- velike su udarne čvrstoće i velike žilavosti, neograničeno se mogu skladištiti, brže se izrađuju, veće istezanje, no imaju i visoku viskoznost, pužanje i malu termičku otpornost [1].

Danas se sve više pažnje usmjerava prema zaštiti okoliša pa je i u području izrade kompozita razvoj usmjeren na korištenje matrica od potpuno biorazgradivih polimera dobivenih iz prirodnih izvora. U promjeni su polilaktid (PLA), polihidroksibutanat (PHB), škrob, celuloza, smole na bazi palminog ulja i drugi polimeri, a kompoziti izrađeni od ovih vrsta polimera ojačanih prirodnim vlaknima nazivaju se bio-kompoziti ili zeleni kompoziti [26].

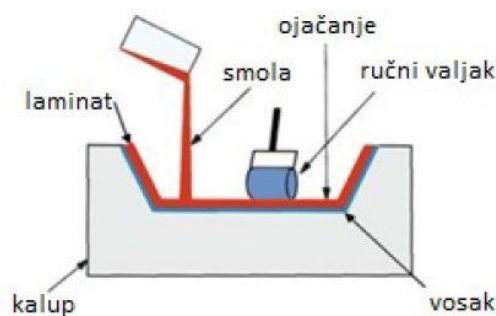
2.1.3. Izrada vlaknima ojačanih kompozita

Općenito, postoji više načina izrade kompozitnih materijala, a neki od njih su:

- Poltrudiranje je proces proizvodnje materijala s nepromjenjivim poprečnim presjekom. Ovom metodom proizvode se štapovi, cijevi i različiti profili. Koriste se termostabilne i termoplastične matrice, a od vlakana se najčešće koriste staklena, ugljikova, aramidna, prirodna vlakna i njihove mješavine. U Europi se samo potrudiranjem godišnje proizvede 16.000 tona VOK-a.
- RIM poltrudiranje je proces koji koristi reakcijsko injekcijsko prešanje i ovim postupkom se mogu koristiti matrice niske viskoznosti. Kao matrice se najčešće

koriste PES, epoksidi, PA i PUR, a kao ojačala staklena, ugljikova, aramidna i polietilen ultravisoke molekulske mase.

- Laminiranje se koristi za proizvodnju u manjim serijama, a postupkom se mogu napraviti veliki dijelovi s minimalnim troškovima obrade (npr. školjka/trup jahti). Postoje 3 vrste laminiranja:
 - Mokro laminiranje- radi se o ručnoj metodi izrade gdje se vlaknato ojačalo slaže u kalup i potom se dodaje polimer niske viskoznosti sprejanjem, točenjem ili četkanjem. Koriste se i valjci radi dodatne penetracije matrice između vlakana. Laminat se gradi sloj po sloj do željene debljine, a radi se pri sobnoj temperaturi bez vakuumu (sl. 5).



Slika 5. Mokro laminiranje [24]

- Sprejno laminiranje- koristi se za male serije proizvoda kompleksnijih oblika. Radi se u otvorenom kalupu na sobnoj temperaturi. Specijalnim pištoljem istodobno se izbacuju vlakanca i matrica na radnu površinu. Valjci se koriste za istiskivanje zraka i poravnavanje, a postupak se ponavlja sve do željene debljine. Prednost ovakve metode je što je jednostavna, jeftina, oprema se lako prenosi, dobivanje točno ženjenih dimenzija, i dr.
- Laminiranje preprega na niskoj temperaturi- ovom metodom mogu se proizvoditi kompoziti velikih dimenzija. Najčešće se koristi za ugljikova vlakna s epoksidnom smolom [1].
- Ručno polaganje slojeva u kalup pod pritiskom (eng. press molding) je unaprjeđenje metode laminiranja. Istiskuje se višak smole i zraka pripravljenog kompozita. Udio istisnute smole ovisi o vrsti ojačala, vrsti smole, brzini polimerizacije, vremenu skrutnjavanja i dr.

- Vakuum vreća (eng. vacuum bagging) koristi se kao nadopuna ručnom laminiranju, a kao rezultat daje čvršće i lakše kompozite.
- Vakuumska infuzija (eng. vacuum resin infusion) je postupak kod kojeg se ojačalo priliježe u kalup uz ostale potrebne dodatke. Vakuumom se zatim ukloni zrak, a ojačalo poprima oblik kalupa uz pomoć vakuum vreće. Smola niske viskoznosti uvodi se u kalup u kratkom vremenu iz promjenu vakuuma i tvori kompozit. Na ovaj način moguće je proizvesti velike dijelove dobrih mehaničkih svojstava s malim udjelom šupljina [26].
- Prešanje se može provoditi na više načina:
- Prešanje u autoklavu- autoklav je velika grijana komora pod tlakom i u njoj se proizvode kompoziti iz preprega. Prepreg je sloj vlakana impregniran matricom. Tanak je i ima udio vlakana 30-40%. Proces proizvodnje je takav da se prepreg nasloji na kalup i vakuumom. Pod utjecajem tlaka i temperature dobivamo željeni oblik.
- Kompresijsko prešanje- omogućuje brzu proizvodnju predmeta kompleksne geometrije. Metoda je dobra za proizvodnju visoko-volumnih kompozita. Ovom metodom se proizvode dijelovi za autoindustriju- kotači, branici, opruge. Izrađuje se iz SMC-a (tanki sloj vlakana u termostabilnom polimeru) koji se slaže na donji zagrijani kalup Spuštanjem gornjeg kalupa nastaje veliki tlak, podiže se temperatura i dobivamo željeni oblik.
- Injekcijsko prešanje- odnosi se na postupak kojim se polimer ubrizgava u zatvorenu kalup željenog oblika. Polimerni granulati ojačani ravnomjerno dispergiranim vlaknima ili mješavinom polimernog granulata i kratkih vlakana uvodi se u komoru za ubrizgavanje u kojoj se zagrijava i prevodi u talinu te se ubrizgava u kalup. Moguće je koristiti i termoplastične i termostabilne polimere za ovaj postupak. Termostabilne se ubrizgava u grijani kalup gdje dolazi do polimerizacije i tvorbe zadanog oblika, a termoplastične se ubrizgava u kalup u kojem se hladi i poprima zadani oblik kalupa [26].
- Namatanje je postupak izrade kompozita gdje se ojačalo namata na alat pod određenim kutovima. To je brz, jednostavan i precizan proces. Ova metoda je jednostavna, jeftina i koristi se kod izrade spremnika, u sportu i medicini te u zrakoplovnoj, vojnoj i svemirskoj industriji [1].

- Ekstrudiranje se primjenjuje za dobivanje kompozita u obliku vlakana ili u obliku polimernog granulata. U ekstruderu dolazi do ravnomjernog miješanja kratkih vlakana i polimera, a u grijanom se cilindru mješavina prevodi iz krutine u talinu. Ovisno o vrsti mlaznice kroz koju se ispreda, mogu se dobiti filamentna vlakna definiranog poprečnog presjeka ili polimerni granulat ojačan vlaknima [26].

Za izradu bio-kompozitnih i hibridnih kompozita ojačanih prirodnim stabljичnim vlaknima najčešće koriste metode ekstrudiranja, injekcijskog i kompresijskog prešanja, mokrog i sprejnog laminiranja, vakuum infuzija i ručnog laminiranja s vakuum vrećom. Od ovih metoda odabrano je mokro, odnosno ručno laminiranje kao način izrade kompozita u radu.

3. METODIKA RADA

3.1. Temeljni pristup istraživanju

Vlaknima ojačani kompoziti su materijali koji se primjenjuju u mnogobrojnim djelatnostima, a koriste se zbog svojih odličnih svojstava koja se ne mogu dobiti samo jednom komponentom nego se dobiva kombinacijom više materijala. U novije vrijeme upotreba prirodnih vlakana kao zamjena za sintetska ojačala (npr. staklena, ugljikova ili aramidna vlakna) unutar kompozita poprima sve veće značenje zbog dobrih svojstava prirodnih vlakana, cijene, ekološke prihvatljivosti i mogućnosti recikliranja. Najčešće se koriste ojačala izrađena od stabljičnih vlakana, a u ovom radu su korištena tkana ojačala izrađena od lanenih vlakana skupa sa tkanima staklenim ojačalima. Kroz dobivene rezultate analizirana je mogućnost potpune ili djelomične zamjene staklenih vlakana lanenim u proizvodnji vlaknima ojačanih kompozita. Ova zamjena imala bi značajan doprinos brizi o okolišu jer su lanena vlakna oporabljiva, biorazgradiva, ali i prilično otporna na vlačna opterećenja.

Ciljevi ovog rada su:

- Uhodati postupak izrade kompozitnih ploča ojačanih staklenim i lanenim ojačalima postupkom ručnog laminiranja u laboratorijskim uvjetima;
- Karakterizirati ojačala primijenjena u izradi kompozitnih ploča;
- Karakterizirati dobivene kompozitne ploče ispitivanjem masenog i volumnog udjela vlakana, te mehaničkih svojstava- vlačne čvrstoće, savojne čvrstoće, međuslojne čvrstoće i tvrdoće;
- Usporediti dobivene kompozite ojačane staklenim vlaknima s kompozitima ojačanim lanenim vlaknima.

3.2. Materijali i metode

3.2.1. Primijenjene pređe

U tablici 1. navedene su osnovne karakteristike pređa primijenjenih za izradu ojačala.

Tablica 1. Svojstva pređa primijenjenih za izradu tkanih ojačala [17,24,27].

Pređa	Finoća [tex]	Prekidna sila [N]	Prekidno istezanje[%]
Staklena roving pređa 1	600	278,68	2,99
Staklena roving pređa 2	1200	514,19	3,18
Lanena roving pređa 1	600	171,91	3,36
Lanena roving pređa 2	1200	192,48	2,43
Lanena predena pređa	140	17,28	5,28

3.2.2. Karakterizacija ojačala

Ojačala koja su korištena u ovom radu tkana su u platnom vezu – staklena ojačala dobivena industrijskim putem te lanena izrađena u laboratorijskim uvjetima na TTF-u [24,27]. Tkani materijali sastoje se od dva sustava niti: osnovinih i potkinih koji se međusobno isprepliću. Uzdužni smjer niti naziva se smjer osnove, a poprečni smjer potke. U platnom vezu osnovine niti isprepliću se naizmjenice s potkinim nitima i tvore vez koji ima najviše veznih točaka. Zbog najvećeg broja veznih točaka ovaj vez ima i najveću čvrstoću od svih tkanih struktura.

U sklopu rada bilo je potrebno otkati ojačalo iz lanene roving pređe finoće 1200 tex-a. Tkanina je ručno otkana pomoću ravnala je služio za postizanje zijeve kroz koji se uvode potkine niti. Osnovine niti su stabilizirane pomoću papirnatog ljepljiva na površinu pri tome vodeći računa da na 1 cm budu 2 niti pređe (sl. 6).



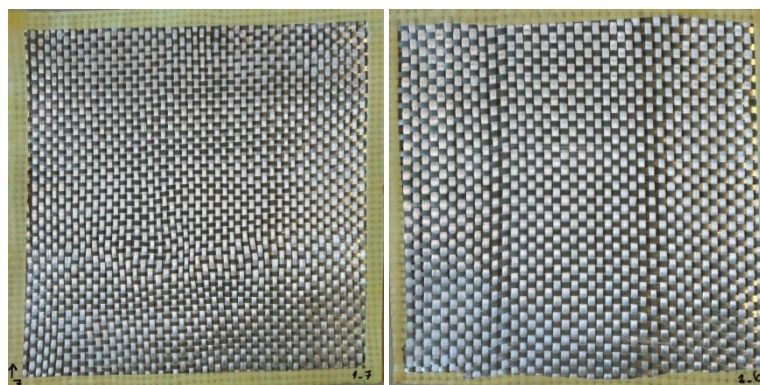
a)

b)

Slika 6. laneno ojačalo iz lanene roving pređe u platnenom vezu: a) izrada, b) gotovo ojačalo

U radu je korišteno 5 vrsta tkanih ojačala, od toga 2 tipa staklenih i 3 tipa lanenih ojačala (sl. 7):

- S1- ojačalo izrađeno od staklene roving pređe 1 finoće 600 tex-a (2D),
- S2- ojačalo izrađeno od staklene roving pređe 2 finoće 1200 tex-a (2D),
- L1- ojačalo izrađeno od lanene roving pređe 1 finoće 600 tex-a (2D),
- L2- ojačalo izrađeno od lanene roving pređe 2 finoće 1200 tex-a po osnovi i predene lanene pređe u potci (UD),
- L3- ojačalo izrađeno od lanene roving pređe 2 finoće 1200 tex-a (2D).



a)

b)



c)

d)

e)

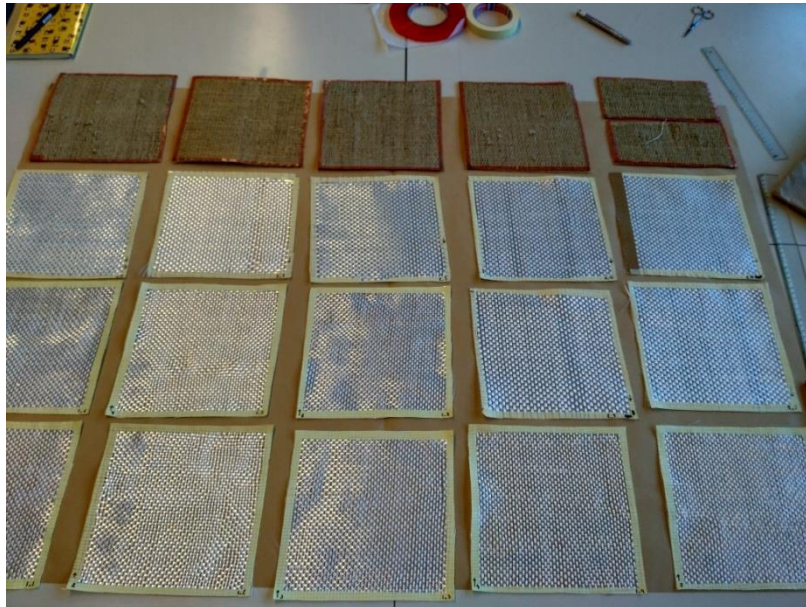
Slika 7. Ojačala korištena za kompozitne ploče: a) ojačalo S1, b) ojačalo S2, c) ojačalo L1, d) ojačalo L2, e) ojačalo L3

Ojačala su izrezana na odgovarajuće dimenzije, 220x220 mm. Izrezano je ukupno 24 komada tkanih ojačala i to:

- 10 komada iz staklenog ojačala oznake S1 (označeni kao: S1_1 - S1_8; S1_11-S1_12)
- 7 komada iz staklenog ojačala oznake S2 (označenih kao S2_1 – S2_7)
- 5 komada iz lanenog ojačala oznake L1 (označenih kao L1_1 – L1_5)
- 1 komad iz lanenog ojačala oznake L2 (označen kao L2), te
- 1 komad iz lanenog ojačala oznake L3 (označen kao L3)

i 2 komada ojačala dimenzija 250x250 mm izrađenih od staklenog ojačala oznake S1 (označenih kao S1_9 i S1_10).

Svim su uzorcima rubovi pričvršćeni ljepljivom trakom (sl. 8) kako ne bi došlo do rasipanja ojačala i kako bi se sačuvala struktura. Time se olakšao postupak rezanja uzoraka i kasnijeg rukovanja.



Slika 8. Izrezani komadi staklenih i lanenih ojačala

Izrezanim uzorcima ojačala određena je:

1. debljina prema HRN EN ISO 5084:2003 [28]

Debljina plošnog proizvoda se definira kao razmak između dvije metalne ravne paralelne ploče razdvojene tkaninom koja se nalazi pod određenim pritiskom. Mjerenje se provodi pomoću debljinomjera uz preciznost rezultata 0,01 mm. Debljinomjer se sastoji od podloge na koju se stavi ispitivani materijal i pritiskivača kružnog oblika i s kojim se materijal pritišće određenom silom. Pritiskivač je povezan s djelom za registriranje i prikazivanje rezultata. Površina pritiskivača, opterećenje i sila kojom se pritišće ovise o materijalu koji se ispituje. U ovom radu je korišten pritiskivač površine $0,78\text{cm}^2$ i sila od 1 kPa uz opterećenje od 500 g. Načinjeno je 5 mjerenja, a kao rezultat dana srednja vrijednost dobivenih rezultata mjerenja.

2. masa

Određena je masa svih dobivenih uzoraka pomoću digitalne vage marke KERN preciznosti 0,1g (sl. 9). Ovaj podatak će biti korišten pri izračunu masenog i volumnog udjela ojačala u kompozitnim pločama.



Slika 9. Određivanje mase uzoraka

U svrhu daljnjih ispitivanja izrezani su uzorci dimenzija 10x10 cm (sl. a) i na njima ispitana:

1. plošnu masu prema HRN ISO 3801:2003 [29]

Plošna masa se definira kao masa jednog četvornog metra plošnog proizvoda izražena u gramima. Mjerna jedinica je g/cm^2 , a u navedenoj normi postoje 2 mogućnosti ispitivanja: na kondicioniranim ili na apsolutno suhim uzorcima. U ovom radu ispitivana plošna masa je određena na kondicioniranim uzorcima. Svim su uzorcima rubovi pričvršćeni ljepljivom trakom kako ne bi došlo do rasipanja ojačala (sl. 10.a) i kondicionirani namjanje 24 sata.

Plošna masa izračunata je prema izrazu:

$$PM = m_k \times 100(1)$$

Gdje su:

PM - plošna masa [g/cm^2],

m_k - masa kondicioniranog uzorka [g].

2. količina vlage

Količina vlage u ispitivanju iskazana je kao repriza. Repriza se definira kao količina vlage koja se nalazi u vlaknu dovedenom u ravnotežno stanje s prostorom određenog stanja zraka i iskazuje se kao postotak u usporedbi s apsolutno suhom masom uzorka [15]. Uzorci su kondicionirani u prostoru standardne atmosfere 24h nakon čega im je

utvrđena masa kondicioniranog uzorka u gramima. Nakon toga su uzorci stavljeni u sušnicu na temperaturu $105 \pm 2^\circ\text{C}$ na 24h (sl. 10.b). Nakon sušenja utvrđena je masa apsolutno suhog uzorka. Količina vlage izračunata je prema izrazu:

$$V_r = \frac{m_k - m_{as}}{m_{as}} \times 100 \quad (2)$$

Gdje su:

V_r - ravnotežna vlaga,

m_k - masa kondicioniranog uzorka [g],

m_{as} - masa apsolutno suhog uzorka [g].



a)

b)

Slika 10. a) uzorci za ispitivanje dimenzija 10x10 cm, b) sušenje uzoraka

3. broj niti osnove i potke po centimetru prema HRN EN 1049-2:2003 [30]

Broj niti osnove i potke na duljini od jednog centimetra definira se kao gustoća tkanina i utvrđuje se izbrojavanjem uz pomoć povećala i/ili paranjem epruveta određenih dimenzija. Potrebno je načiniti 5 mjerenja, a kao rezultat se prikazuje srednja vrijednost.

3.2.3. Izrada kompozitnih ploča

Kompozitne ploče izrađivane su u Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja materijala koji se nalazi na Zavodu za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila Tekstilno-tehnološkog fakulteta u Zagrebu. Kao kalup za kompozitne ploče korištena su 4 kalupa izrađena od oplemenjenog bijelog iverala, debljine 12 mm, dimenzija 250x250 mm koji je služio kao podloga i ručno izrađenih okvira od kutne lajsne L profila, dimenzija 28x28 mm izrađene od bora (sl. 11).



Slika 11. Kalup za izradu kompozitnih ploča- podloga i okvir

Kalupi su prije izrade kompozitnih ploča premazani s 5 slojeva sredstva za odjeljivanje trgovačkog naziva Chemlease®2185 Semi-Permanent Release Agent, Chem-Trend (sl. 12). Sredstvo pomaže pri odvajanju kompozitnih ploča iz kalupa nakon sušenja. U opisu proizvoda stoji da je to tekuća disperzija koja stvara polimerni film na površini kalupa. Prije nanošenja sredstva kalupi trebaju biti čisti, bez voskova, silikona i vlage kako bi sredstvo bilo učinkovito. Proizvod se nanaša pamučnom krpicom tako da se obilno premazuje dio po dio dok se ne pokrije cijela površina kalupa. Kad se površina kalupa zamuti potrebno je čistom suhom krpom polirati kako bi površina postala sjajna. Postupak je potrebno ponoviti 1-6 puta. Nakon nanesenog zadnjeg sloja potrebno je pričekati najmanje 30 min prije korištenja kalupa.



Slika 12. Premazivanje kalupa sredstvom za odvajanje

Napravljeno je ukupno 13 ploča u različitim kombinacijama ojačala, a kao matrica je korištena nezasićena poliesterska smola tvorničkog naziva AROPOL™ M105, Aropol TB. U opisu proizvoda stoji da je podobna za ručno ili sprejno laminiranje pri izradi vlaknima ojačanih kompozita te da se koristi za brodogradnju, građevinarstvo i transportnu industriju. U matricu je dodan i otvrdnjivač Butanox® M-50, Akzo Nobel Polymer Chemicals koji je po kemijskom sastavu metil etil keton peroksid otopina u dimetil ftalatu.

Radi usporedivosti, pri izradi kompozitnih ploča, pazilo se da ploče budu približno jednake debljine te da se u svakoj ploči nalazi isti volumen matrice (200ml). Matrica je pripremana u papirnatim čašama, a drveni štapići korišteni su za miješanje te kasnije za pozicioniranje ojačala pri izradi kompozitnih ploča (sl. 13).



Slika 13. Priprema matrice u papirnoj čaši

3.2.3.1. Ploča S1_I.– kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1

Uzorak S1_I. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 1% otvrdnjivača. Kalup je stavljen na ravnu površinu i niveliran. Kompozitna ploča je izrađena tako da je dio smole izliven na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole i postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Valjak je koristio i za istjerivanje mjehurića zraka koji su ostali zarobljeni unutar kompozitne ploče. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h. U tablici 2 prikazana su ojačala koja su korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 2. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1_I.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S1_1	S1_2
Masa ojačala [g]	15,2	15,1
Debljina ojačala [mm]	0,30	0,30
V [%]	3,333	1,802

Zapažanja: Smola je iscurila kroz prostor između podloge i okvira kalupa. Ploča je uz veliki napor izvučena iz kalupa (sl. 14), no nije dobiven željeni rezultat. Kod izrade iduće ploče potrebno je dodatno zalijepiti kalup i popuniti rupe između podloge i okvira. Također, dobro je dodati 2% otvrdnjivača jer je bilo potrebno više vremena da se ploča stisne.



Slika 14. Odvajanje kalupa i rezultat izrade kompozitne ploče S1_I.

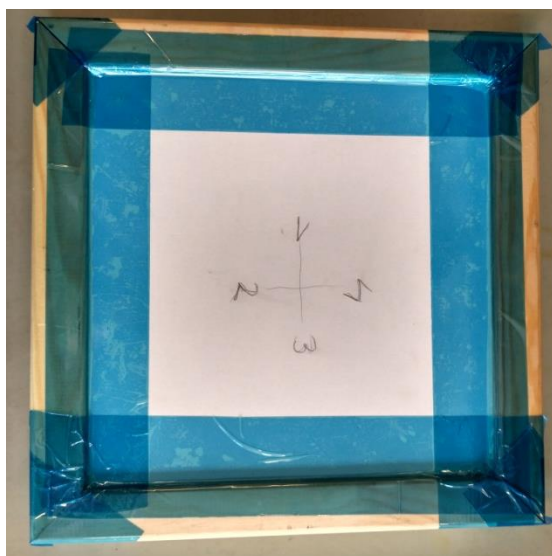
3.2.3.2. Ploča S2_I.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2

Uzorak S2_I. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S2. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kompozitna ploča je izrađena tako da je dio smole izliven na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole i postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 24h. U tablici 3 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 3. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S2_I.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S2_1	S2_2
Masa ojačala [g]	24,0	25,3
Debljina ojačala [mm]	0,50	0,48
V [%]	3,009	4,167

Zapažanja: Kalup je zalijepljen s donje strane ljepljivom trakom (sl. 15a), te je komadima aluminijske folije pokušalo se zatvoriti otvore između podloge i okvira kalupa. Smola je ipak iscurila između aluminijske folije pa je bilo potrebno kompozitnu ploču odvajati od kalupa pomoću čekića. Rubovi kompozitne ploče su popucali na dijelovima gdje se nalazi samo matrica (sl. 15.b). Ploča se također savinula jer je izvađena nakon 24h pa se za iduće ploče preporučuje da ostanu u kalupu najmanje 48h.



a)



b)

Slika 15. a) kalup pričvršćen ljepljivom trakom, b) S2_I. kompozitna ploča

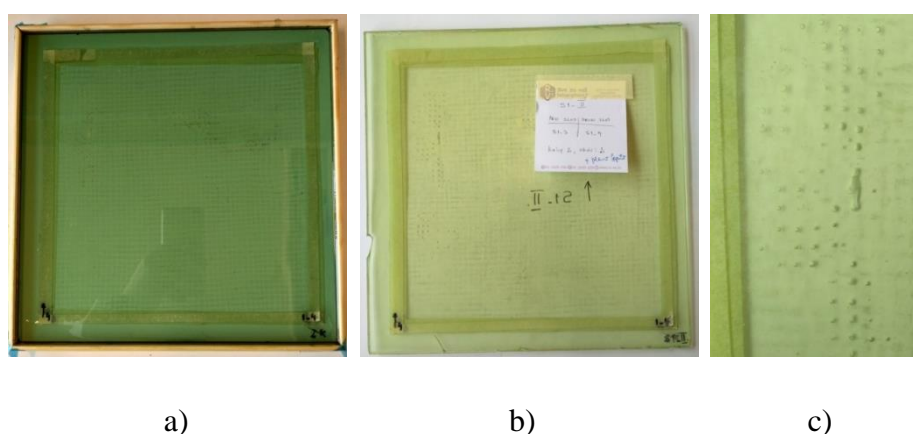
3.2.3.3. Ploča S1_II.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1

Uzorak S1_II. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kompozitna ploča je izrađena tako da je dio smole izliven na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole i postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 24h (sl. 16.a). U tablici 4 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 4. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1_II.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S1_3	S1_4
Masa ojačala [g]	15,0	15,1
Debljina ojačala [mm]	0,31	0,31
V [%]	2,682	2,682

Zapažanja: Kalup je s donje strane pričvršćen ljepljivom takom, te su komadima aluminijske folije zatvoreni otvori u klupu. Smola je ipak iscurila između aluminijske folije pa su kompozitne ploče odvajane od kalupa pomoću čekića. Pojavio se veliki broj mjehurića (sl. 16.b i 16.c) zraka unutar ploče, te je ploča ispala deblja na rubovima. Ploča se savinula kao i prethodna jer je izvađena iz kalupa nakon 24h. Folija nije dobro rješenje za saniranje otvora na kalupu pa se za iduću ploču preporučuje korištenje dvostrukog ljepila.



Slika 16. a) Priprava kompozitne ploče S1_II., b) S1_II. ploča c) mjehurići zraka unutar kompozitne ploče

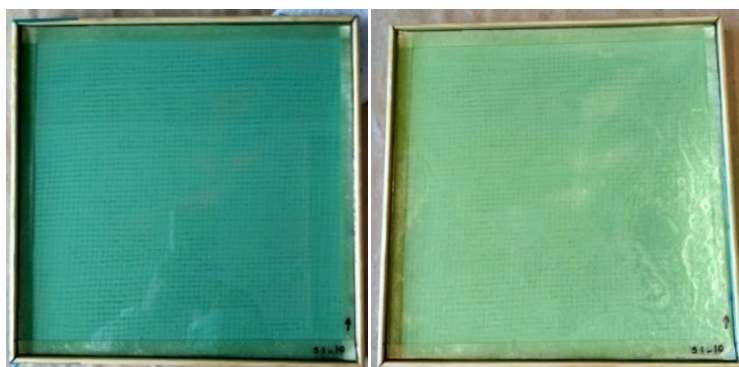
3.2.3.4. Ploča S1_III.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1

Uzorak S1_III. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S1 dimenzija 250x250 mm kako bi prekrrio kalup od ruba do ruba. Polimerna matrica pripremljena je s 200 mL smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je ljepljivom trakom na dnu zalijepljena podlogu i okvir, a podloga na rubovima učvršćena s dvostrukim ljepilom za okvir. Kompozitna ploča je izrađena tako da je dio smole izliven na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole i postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. (sl. 17.a). Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 17.b). U tablici 5 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 5. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1_III.

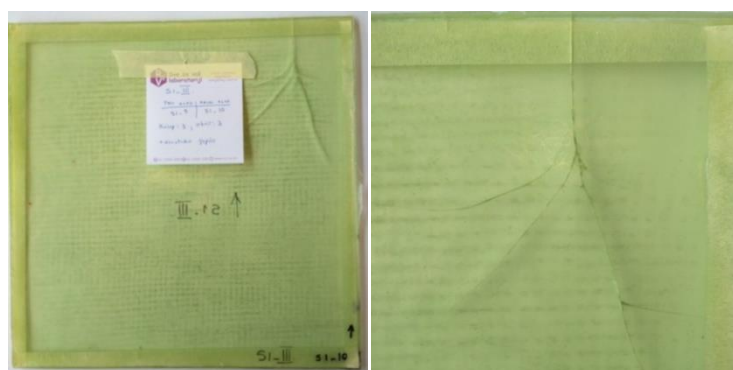
	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S1_9	S1_10
Masa ojačala [g]	19,3	18,9
Debljina ojačala [mm]	0,30	0,29
V [%]	1,481	2,865

Zapažanja: Dvostruko ljepilo je pomoglo malo kod curenja matrice, ali otežalo je odvajanje. Ploča se svejedno zalijepila za kalup te je pri odvajanju čekićem pukla (sl. 17c i 17.d) kao i podloga kalupa. Aceton pomaže pri odvajanju ploče. Ojačalo od ruba do ruba kalupa pokazalo se korisno jer je lakše pripremiti ploču budući da se ojačalo ne pomiče kada se preko njega prelazi valjkom.



a)

b)



c)

d)

Slika 17. Ploča S1_III.a) pri izradi, b) skrutnjavanje, c) gotova ploča, d) pukotina

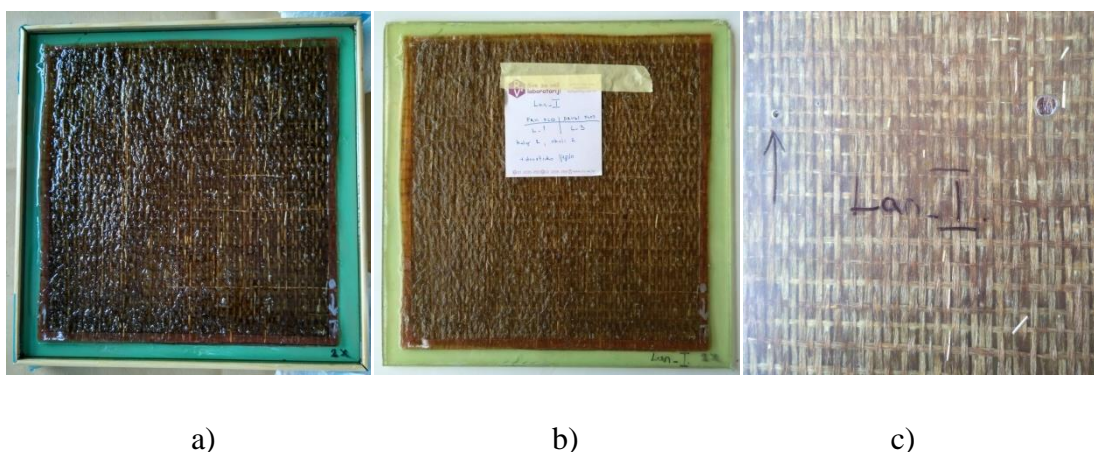
3.2.3.5. Ploča L1_I.-kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala L1

Kompozitna ploča L1_I. ojačana je s 2 komada lanenog ojačala L1 koji je prethodno osušen u sušnici 24h na 80°C. Nakon sušenja ojačala su prebačena u eksikator sa silikagelom na hlađenje. Kalup je pripremljen tako što su ljepljivom trakom podloga i okvir zalijepljeni na dnu, te podloga na rubovima učvršćena dvostrukim ljepilom. Polimerna matrica pripremljena je s 250 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kompozitna ploča je izrađena tako da je stavljen prvi komad lanenog ojačala i na to izliven dio smole. Nakon toga je postavljen drugi komad lanenog ojačala, izliven ostatak smole i pređeno valjkom preko cijele površine kalupa (sl. 18.a). Ploča je ostavljena da se skrutjava 48h. U tablici 6 prikazana su ojačala koja korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 6. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče L1_I..

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	L1_1	L1_3
Masa ojačala [g]	19,3	18,6
Debljina ojačala [mm]	1,41	1,33
V [%]	14,092	14,918

Zapažanja: Dvostruko ljepilo je pomoglo kod curenja matrice, ali otežalo je odvajanje ploče od kalupa. Budući da se ploča teško odvajala korišten je čekić. Ploča je ostala cijela, a okvir kalupa je pukao. Zbog problema pri odvajanju dvostrano ljepilo nije najbolje rješenje, treba pronaći neki drugi način. Aceton je pomogao pri odvajanju. Ploča je dosta neravna s lica jer je ojačalo upilo veliku količinu matrice (sl. 18.b). Na ploči su vidljive rupice s naličja (sl. 18.c) pa ubuduće ploče ojačane lanenim vlaknima treba izrađivati tako da se prvo izlije smola na podlogu, pa se onda stavi ojačalo jer laneno ojačalo ima slabiju propusnost (pore između niti su manje, a apsorpcija veća).



Slika 18. Ploča L1_I. a) pri izradi, b) gotova kompozitna ploča s lica, c) rupice na naličju

3.2.3.6. Ploča S1_IV.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1

Uzorak S1_IV. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako da je rub podloge obložen dvostrukim ljepilom i nije korišten okvir. Kompozitna ploča je izrađena tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploču je ostavljena da se

skrutnjava 48h (sl. 19). U tablici 7 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 7. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1_IV.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S1_5	S1_6
Masa ojačala [g]	15,2	15,0
Debljina ojačala [mm]	0,31	0,31
V [%]	1,452	2,923

Zapažanja: Pri izradi ploče na jednom vrhu okvira izlazili mjehurići, izgledalo je kao da bi ljepilo moglo popustiti i propustiti matricu. Pri izradi iduće kompozitne ploče preporučuje se staviti i okvir kalupa ali samo kao potporu ljepilu. Pri vađenju ploče iz kalupa vidljivo je da se dvostrano ljepilo otopilo i procurilo na kompozitnu ploču pa se preporučuje korištenje nekog drugog ljepila.



Slika 19. Kompozitna ploča S1_IV.

3.2.3.7. Ploča S2_II.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2

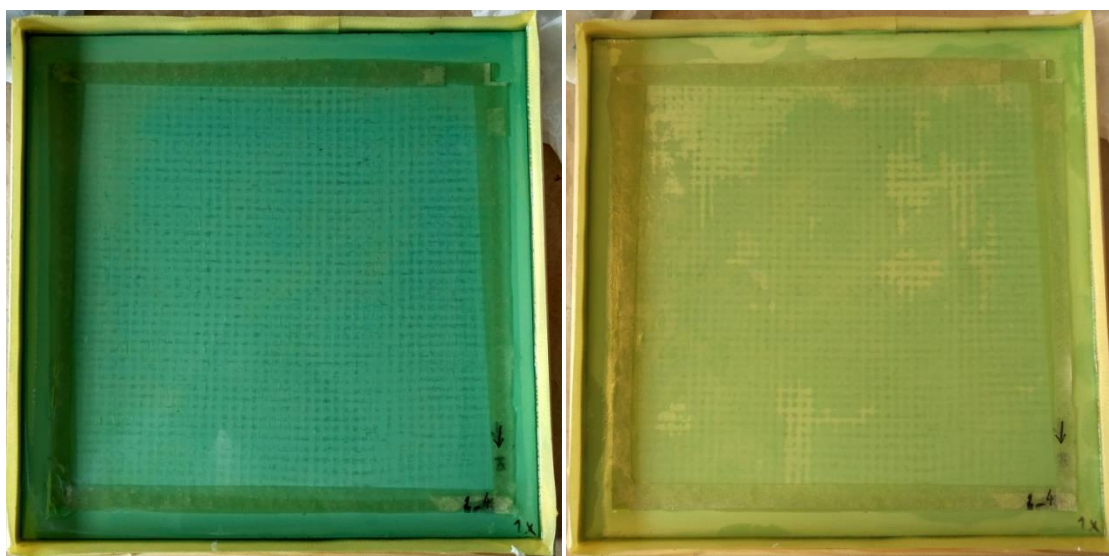
Uzorak S2_II. ojačan je s 2 komada staklenog ojačala S2. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen dvostruko ljepljivom trakom, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora. Kompozitna ploča je izrađena tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan prvi komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen drugi komad staklenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka.

Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 20). U tablici 8 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 8. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S2_II.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S2_3	S2_4
Masa ojačala [g]	24,9	24,2
Debljina ojačala [mm]	0,46	0,47
V [%]	2,457	6,930

Zapažanja: Dvostruko ljepljivu traku je teško skinuti s podloge, pa se preporučuje da se ne dira.



Slika 20. Kompozitna ploča S2_II.prije i nakon skrutnjavanja

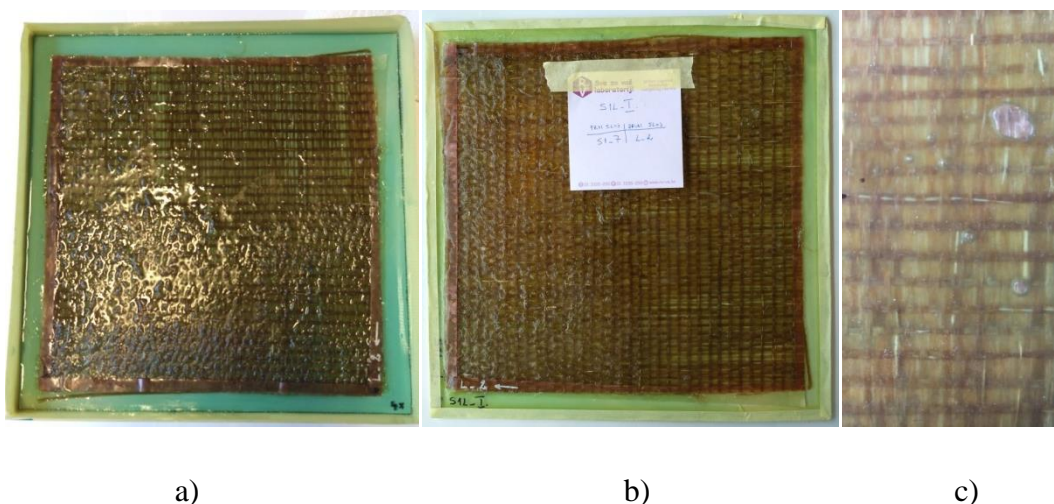
3.2.3.8. Ploča S1L1_I.- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1

Uzorak S1L1_I. ojačan je jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim slojem lanenog ojačala L1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen dvostrukim ljepilom, a okvir kalupa korišten samo kao potpora. Kompozitna ploča je izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen komad lanenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl.21.a i 21.b). U tablici 9 prikazana su ojačala koja su korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 9. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1L1_I.

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S1_7	L1_2
Masa ojačala [g]	15,4	19,7
Debljina ojačala [mm]	0,31	1,27
V [%]	0	38,812

Zapažanja: Nakon skrutnjavanja na naličju vidljivi mjehurići zraka koji su ostali zarobljeni između slojeva ojačala (sl. 21.c). Ploča je hrapava s lica, ali malo manje nego ploča u kojoj su dva sloja lanenog ojačala. Razmotriti mogućnost da se stavi komad folije na površinu kako bi se izravnala ili staviti stakleno ojačalo kao gornji sloj ojačala.



Slika 21. Kompozitna ploča S1L1_I.: a) tijekom izrade, b) dovršena c) mjehurići

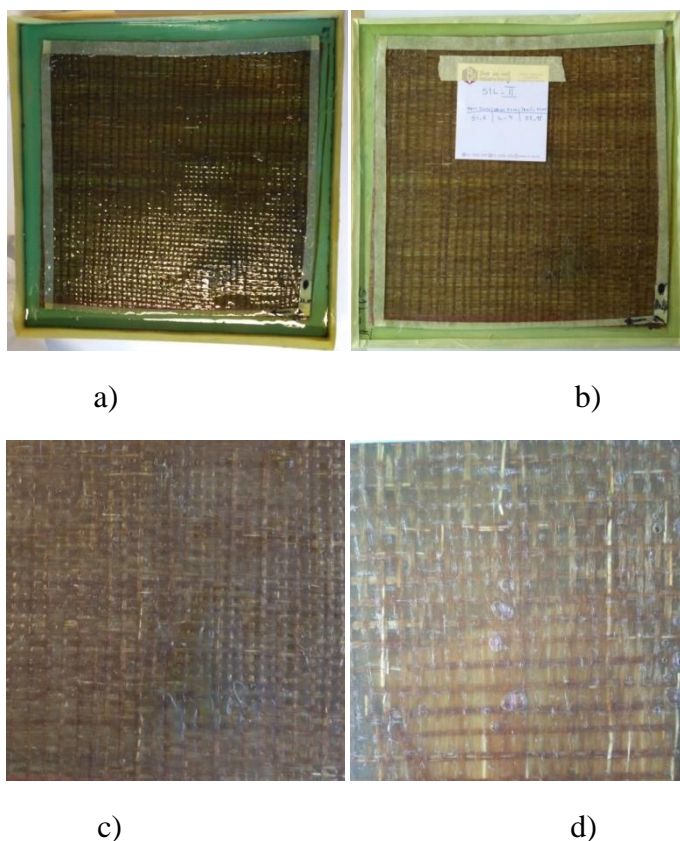
3.2.3.9. Ploča S1L1_II.- kompozitna ploča ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1

Uzorak S1L1_II. ojačan je s dva komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen dvostrukim ljepilom, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora. Kompozitna ploča je izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven dio smole, postavljen komad lanenog ojačala te izliven ostatak smole na koju je stavljen komad staklenog ojačala. Za kraj je valjkom pređeno preko cijele površine kalupa. Ploču je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 22.a i 22.b). U tablici 10 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 10. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S1L1_II.

	Prvi sloj	Drugi sloj	Treći sloj
Oznaka ojačala	S1_8	L1_4	S1_11
Masa ojačala [g]	15,1	19,4	14,8
Debljina ojačala [mm]	0,30	1,43	0,31
V [%]	4,082	9,894	1,790

Zapažanja: Pri samom početku skrutnjavanja pojavila se izbočina na licu ploče (sl. 22.c). Ploča je na ostalim mjestima glađa nego kompozitna ploča S1L1_I. što pokazuje da je dobro staviti stakleno ojačalo kao gornji sloj ojačala. S naličja nakon skrutnjavanja vidljivi mjehurići zraka zarobljeni u matrici (sl. 22.d).



Slika 22. Kompozitna ploča S1L1_II.: a) prije skrutnjavanja, b) gotova, c) izbočina na licu ploče d) mjehurići na naličju ploče

3.2.3.10. Ploča S1_V.- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1

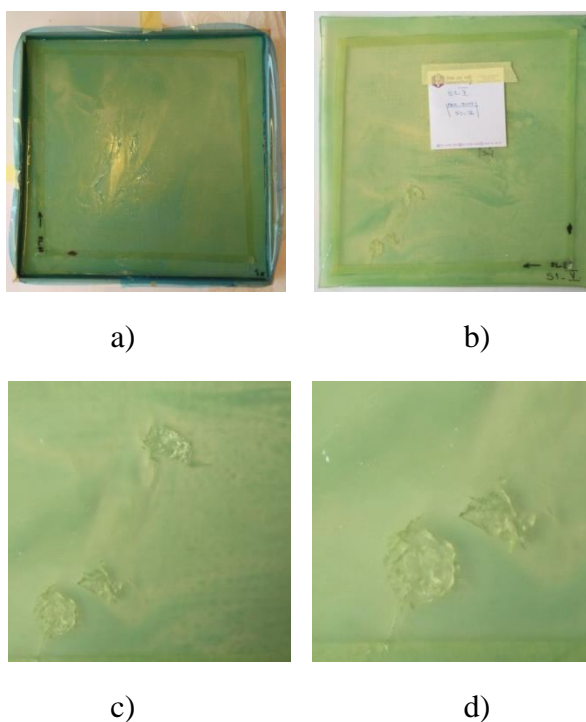
Uzorak S1_V. ojačan je s jednim komadom staklenog ojačala S1. Polimerna smola pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako da je rub podloge obložili ljepljivom trakom pričvršćenom papirnatom ljepljivom trakom da se ne savine, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora (sl 23.a). Kompozitna ploča je

izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu, na smolu dodan komad staklenog ojačala preko kojeg je izliven ostatak smole i pređeno valjkom preko cijele površine kalupa. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 23.b). U tablici 11 prikazano je ojačalo korišteno pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 11. Ojačalo korišteno pri izradi kompozitne ploče S1_V.

	Prvi sloj
Oznaka ojačala	S1_12
Masa ojačala [g]	15,1
Debljina ojačala [mm]	0,31
V [%]	1,767

Zapažanja: Ljepljiva traka korištena pri izradi ploče pokazala se izvrsno rješenje. Lako se skida s podloge, ne propušta matricu i ne otapa se u doticaju s njom. Ljepilo nije dovoljno čvrsto da stoji samo za sebe, nego se uvija prema unutra pa je potrebno dodatno učvrstiti papirnatim ljepljivom trakom za površinu sa strane. Nakon izrade ploče zaključeno da ne treba raditi ploče ove debljine s jednim slojem ojačala. Također, na ploči su vidljive pukotine (sl. 23.c i 23.d) koje su moguće izazvane nedovoljno dugim miješanjem otvrdnjivača i matrice tijekom pripreve pa je potrebno ubuduće dobro promiješati smjesu.



Slika 23. Kompozitna ploča S1_V.: a) pri izradi, b) gotova, c) i d) pukotine

3.2.3.11. Ploča S2L2- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L2

Uzorak S2L2 ojačan je s 1 komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L2. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen ljepljivom trakom pričvršćenom papirnatom ljepljivom trakom da se ne savine, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora (sl. 24.a). Kompozitna ploča je izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen komad lanenog ojačala koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 24.b). U tablici 12 prikazana su ojačala koja su korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 12. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S2L2

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S2_5	L2
Masa ojačala [g]	24,0	23,6
Debljina ojačala [mm]	0,48	1,65
V [%]	1,736	5,633

Zapažanja: Ploča je hrapava po površini zbog specifične površinske strukture lanenog ojačala. Zbog toga bi valjalo probati poravnati površinu postavljanjem aluminijske folije preko površine pri izradi.



Slika 24. Kompozitna ploča S2L2

3.2.3.12. Ploča S2L3- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L3

Uzorak S2L3 ojačan je s 1 komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L3. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen ljepljivom trakom pričvršćenom papirnatim ljepilom da se ne savine, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora (sl. 25a). Kompozitna ploča je izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen komad lanenog koji je uronjen u matricu pomoću valjka. Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h (sl. 25b). U tablici 13 prikazana su ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 12. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S2L3

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S2_6	L3
Masa ojačala [g]	24,6	24,4
Debljina ojačala [mm]	0,49	1,66
V [%]	3,910	25,933

Zapažanja: Ploča je hrapava po površini zbog lanenog ojačala, no manje nego kompozitna ploča S2L2. Ploča je izrađena bez poteškoća.



Slika 25. Kompozitna ploča S2L3

3.2.3.13. Ploča S2L1- kompozitna ploča ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L1

Uzorak S2L1 ojačan je s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim slojem lanenog ojačala L1. Polimerna matrica pripremljena je s 200 ml smole i 2% otvrdnjivača. Kalup je pripremljen tako što je rub podloge obložen ljepljivom trakom pričvršćenom papirnatim ljepilom da se ne savine, a okvir kalupa je korišten samo kao potpora. Kompozitna ploča je izrađivana tako da je izliven dio smole na podlogu i na smolu dodan komad staklenog ojačala. Nakon toga je izliven ostatak smole, postavljen komad lanenog ojačala te je sve prekriveno aluminijskom folijom. Na foliju je postavljena druga podloga kalupa i na nju utezi (sl. 26.a). Ploča je ostavljena da se skrutnjava 48h. U tablici 14 prikazana su ojačala koja smo koristili pri izradi kompozitne ploče.

Tablica 14. Ojačala korištena pri izradi kompozitne ploče S2L1

	Prvi sloj	Drugi sloj
Oznaka ojačala	S2_7	L1_5
Masa ojačala [g]	24,5	18,3
Debljina ojačala [mm]	0,48	1,51
V [%]	2,395	8,043

Zapažanja: Postavljanjem folije i pritiskom s gornje strane pokušalo se dobiti glađu površinu kompozitne ploče. Ploča je manje hrapava nego ostale ploče s lanenim ojačalom, ali folija se zalijepila za površinu te se nije uspjela odvojiti do kraja (sl. 26.b). Zbog pritiska s gornje strane dio matrice je iscurio, pa je ploču bilo puno teže odvojiti od kalupa. Ploča je na rubnom dijelu pukla pri odvajanju.



Slika 26. Kompozitna ploča S2L1

3.2.4. Karakterizacija kompozitnih ploča

Nakon izrade kompozitnih ploča odabrano je 8 ploča koje će se podvrgnuti daljnjim ispitivanjima, a njihove oznake i opisi prikazani su u tablici 15. Ove ploče su izabrane jer su najhomogenije i nastale bez velikih pogrešaka pri izradi.

Tablica 15. Kompozitne ploče izabrane za daljnja ispitivanja

Oznaka kompozitne ploče	Opis
S1_IV.	ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1
L1_I.	ojačana s 2 komada lanenog ojačala L1
S1L1_I.	ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1
S1L1_II.	ojačana s 2 komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1
S2_II.	ojačana s 2 komada staklenog ojačala S2
S2L2	ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L2
S2L3	ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L3
S2L1	ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S2 i jednim komadom lanenog ojačala L1

Bilo je potrebno odrezati rubove kompozitnih ploča do linije ojačala budući da u daljnja ispitivanja ulaze samo dijelovi koji su ojačani ojačalom. Ploče od staklenih vlakana rezane su mokrim dijamantnim rezačem (sl. 27.a), dok kompozitne ploče s lanom nisu pogodne za taj stroj jer proizvode visoke zvukove pri rezanju i pružaju veliki otpor te uništavaju dijamantni disk rezača. Kompozitne ploče koje sadrže lanena vlakna rezani su na suhoj rezalici (sl. 27.b). Ploče su izrezane tako da je i rub s ljepljivom trakom ušao u uzorak budući da je masa ojačala mjerena skupa sa njim pa je potreban pri izračunu masenog i volumnog udjela vlakana. No pri rezanju uzoraka za mehanička ispitivanja taj dio je odbačen kako ne bi utjecao na mehanička svojstva. Svim kompozitnim pločama se utvrdila i debljina. Bilo je potrebno načiniti 5 mjerenja, a kao rezultat se daje srednja vrijednost dobivenih rezultata.



Slika 27. Rezanje ploča na mokrom i suhom rezaču

3.2.4.1. Izračun masenog i volumnog udjela vlakana u kompozitnim pločama

Iz podataka o masi ojačala i masi kompozitnih ploča izračunate su mase matrice koje su upotrebljene pri izradi kompozitnih ploča. Na osnovu utvrđenih masa izračunat je maseni i volumni udio vlakana u kompozitu.

Maseni udio vlakna izračunat je prema izrazu 3:

$$W_v = \frac{m_o}{m_k} \times 100 \quad (3)$$

gdje je:

W_v - maseni udio vlakana u kompozitu [%],

m_o - masa ojačala [g],

m_k - masa kompozita [g].

Volumni udio vlakana u kompozitnim pločama ojačanim samo jednom vrstom ojačala izračunat je prema izrazu 4:

$$V_v = \frac{(m_v / \rho_v)}{[(m_v / \rho_v) + (m_m / \rho_m)]} \times 100 \quad (4)$$

gdje su:

V_v - volumni udio vlakana u kompozitnoj ploči [%],

m_v - masa vlakna [g],

m_m - masa matrice [g],

ρ_c - gustoća vlakana [g/cm^3],

ρ_m - gustoća matrice [g/cm^3].

Volumni udio vlakana u kompozitnim pločama ojačanim s 2 vrste ojačala izračunat je prema izrazu:

$$V_v = \frac{(m_l / \rho_l) + (m_s / \rho_s)}{[(m_l / \rho_l) + (m_s / \rho_s) + (m_m / \rho_m)]} \times 100 \quad (5)$$

gdje su:

V_v - volumni udio vlakana u kompozitnoj ploči [%],

m_l - masa lanenog vlakna [g],

m_s - masa staklenog vlakna [g],

m_m - masa matrice [g],

ρ_l - gustoća lanenog vlakna [g/cm^3],

ρ_s - gustoća staklenog vlakna [g/cm^3],

ρ_m - gustoća matrice [g/cm^3].

Prilikom izračuna korištene su sljedeće vrijednosti gustoće:

- gustoća lanenih vlakana- $1,45 \text{ g}/\text{cm}^3$,
- gustoća staklenih vlakana- $2,55 \text{ g}/\text{cm}^3$,
- gustoća smole- $1,1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

3.2.4.2. Mehanička svojstva kompozitnih materijala

Zbog opsežnosti ispitivanja izabrane su 4 kompozitne ploče na kojima su provedena ispitivanja mehaničkih svojstava. Ploče na kojima smo ispitivali mehanička svojstva prikazane su u tablici 16.

Tablica 16. Kompozitne ploče za ispitivanje mehaničkih svojstava

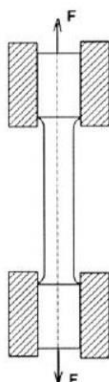
Oznaka kompozitne ploče	Opis
S1_IV.	ojačana s dva komada staklenog ojačala oznake S1
L1_I.	ojačana s dva komada lanenog ojačala oznake L1
S1L1_I.	ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1
S1L1_II.	ojačana s dva komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1

Za odabrane kompozitne ploče utvrđene su:

- vlačna čvrstoća,
- savojna čvrstoća,
- međuslojna smična čvrstoća i
- tvrdoća metodom utiskivanja kuglice.

Sva svojstva su ispitana u smjeru izrade kompozita, odnosno u smjeru osnove ojačala.

3.2.4.2.1. Vlačna čvrstoća prema HRN EN ISO 527-4:2008[31]



Slika 28. Ispitivanje vlačne čvrstoće [32]

Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je na univerzalnoj kidalici marke VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein (sl. 29.a) na kojoj se epruveta kontinuirano rastezno opterećuje do loma kao što je prikazano na slici 28 [33,34]. Na univerzalnoj kidalici kontinuirano se očitava sila, te maksimalna sila nakon loma epruvete. Početni razmak između stezaljki je 50 mm, mjerno područje od 0 do 4800N, a brzina opterećivanja je 5mm/min. Produljenje se očitava pomoću kontaktnog ekstenziometra (sl. 29.c). Ekstenziometar je mjerni uređaj za određivanje promjene udaljenosti između dvije točke [35]. Uređaj se postavlja na epruvetu tako da se ticalima (po 2 para sa svake strane uređaja) pričvrsti na epruvetu (sl. 29.b). Uređaj ima 2 sata od kojih jedan prikazuje produljenje na lijevoj, a drugi na desnoj strani epruvete. Konačnu vrijednost uzimamo kao srednju vrijednost produljenja lijeve i desne strane. Ispitivanje smo proveli na 4 epruvete oblika i dimenzija prilagođenih normi (duljina: 150 mm, širina: 10 mm, mjerna duljina 50 mm).



a)

b)



c)

Slika 29. a) univerzalna kidalica, b) ekstenziomenar na epruveti c) ekstenziometar

Vlačna čvrstoća izračunata je prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_o} \quad (6)$$

gdje su:

R_m - rastezna čvrstoća [MPa],

F_{\max} - maksimalna sila opterećenja [N],

S_o - površina početnog presjeka [mm²].

Modul elastičnosti izračunat je prema izrazu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

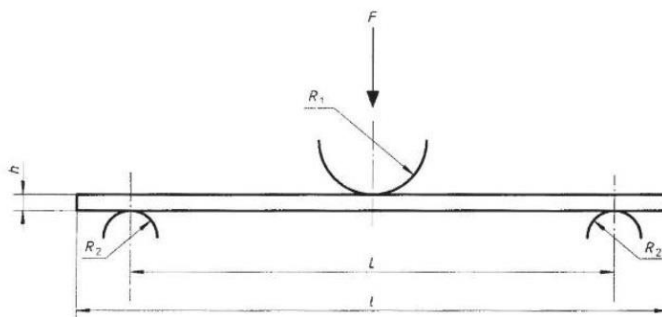
gdje su:

E - modul elastičnosti [MPa],

σ - naprezanje [MPa],

ε - produljenje [mm].

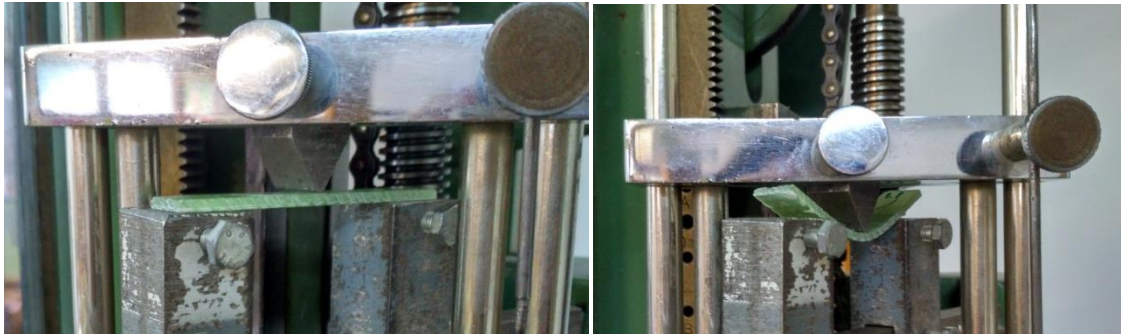
3.2.4.2.2. Savojna čvrstoća prema HRN EN ISO 14125:2005/A1:2011[36]



Slika 30. Skica ispitivanja savojne čvrstoće [34]

Za ispitivanje su pripremljeno 5 pruveta pravokutnog poprečnog presjeka duljine 80 mm i širine 15 mm. Ispitivanje se provodi na univerzalnoj kitalici marke VEB

Thüringer Industriewerk Rauenstein klase 0,5 (sl. 30 i 31). Razmak između oslonaca se određuje individualno za svaku kompozitnu ploču, a izračuna se tako da se prosječna debljina ploča pomnoži s brojem 16. Epruveta se opterećuje tako da trn preko kojeg se prenosi opterećenje utega pritišće uzorak u sredini silom F . Epruveta se opterećuje sve do loma, a za epruvete je mjeren odgovarajući progib (Δf) ovisan o silama opterećenja (sl. 30) [33]. Mjerno područje je postavljeno od 0 do 950 N, a brzina opterećivanja 5 mm/min.



Slika 31. Ispitivanje savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća dobije se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot \check{s} \cdot d^2} \quad (8)$$

gdje su:

R_{ms} - savojna čvrstoća [MPa],

F_p - prekidna sila [N],

L - razmak između oslonaca [mm],

\check{s} - širina uzorka [mm],

d - debljina uzorka [mm].

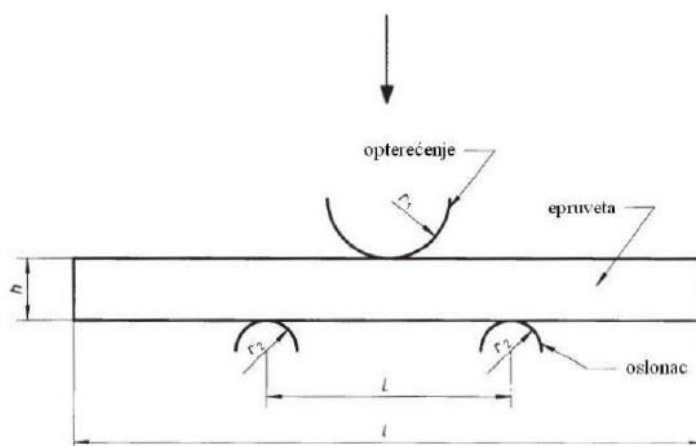
Savojni modul elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E_s = \frac{\Delta F}{\Delta f} \cdot \frac{L^3}{4 \cdot \xi \cdot d^3} \quad (9)$$

gdje je:

$\Delta F/\Delta f$ - $\tan \alpha$ (nagib pravca).

3.2.4.2.3. Međuslojna smična čvrstoća prema HRN EN ISO 14130:2005[37]



Slika 32. Ispitivanje međuslojne čvrstoće [34]

Međuslojna smična čvrstoća je mjera za kvalitetu granične površine. Ovisi o čvrstoći prijanjanja ojačala i matrice, odnosno adheziji. Dobra adhezija je potrebna vlaknima ojačanim kompozitima kako bi mogli podnijeti što više opterećenja. Ispitivanje se također provode na univerzalnoj kraljici marke VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, a radi se slično kao i savojna čvrstoća, samo uz manji razmak između oslonaca (sl. 32). Razmak se izračunava za svaku kompozitnu ploču posebno, a u izračunu se srednja vrijednost debljine pomnoži s brojem 5. Mjerno područje kreće se od 0 do 2400 N, a brzina opterećenja je 5mm/min.

Međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{\max}}{4 \cdot \xi \cdot d} \quad (10)$$

gdje su:

τ - međuslojna čvrstoća [MPa],

F_p - prekidna sila [N],

\check{s} - širina uzorka [mm],

d - debljina uzorka [mm].

3.2.4.2.4. Tvrdoća prema HRN EN ISO 2039-1:2005[38]

Tvrdoća je otpor koje neko tijelo pruža pri prodiranju drugog tijela u njegovu strukturu. Tvrdoća je mjerena utiskivanjem kuglice promjera 5 mm pri sili utiskivanja 13,5 kp, odnosno 132N. Očitane su vrijednosti prodiranja nakon 10,30 i 60 sekundi.

Tvrdoća se izračunava pomoću izraza:

$$H = \frac{1}{\pi \cdot D} \cdot \frac{F}{h_k} = 0,064 \cdot \frac{F}{h} \quad (11)$$

Gdje su:

H - tvrdoća [MPa],,

D - promjer kuglice [mm]

F - sila opterećenja [N],

h_k - dubina prodiranja [mm].

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati karakterizacije ojačala

Rezultati karakterizacije korištenih ojačala dani su u tablicama 17 i 18.

Tablica 17. Debljina i masa ojačala

UZORAK	d [mm]								
	1	2	3	4	5	d_s [mm]	σ [mm]	V [%]	m [g]
S1_1	0,29	0,30	0,29	0,31	0,31	0,30	0,0100	3,333	15,2
S1_2	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,0055	1,802	15,1
S1_3	0,32	0,30	0,31	0,31	0,32	0,31	0,0084	2,682	15,0
S1_4	0,31	0,32	0,31	0,30	0,32	0,31	0,0084	2,682	15,1
S1_5	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,0045	1,452	15,2
S1_6	0,32	0,30	0,31	0,30	0,30	0,31	0,0089	2,923	15,0
S1_7	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,0000	0,000	15,4
S1_8	0,31	0,28	0,30	0,31	0,30	0,30	0,0122	4,082	15,1
S1_9	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30	0,0045	1,481	19,3
S1_10	0,29	0,29	0,30	0,28	0,30	0,29	0,0084	2,865	18,9
S1_11	0,31	0,31	0,30	0,30	0,31	0,31	0,0055	1,790	14,8
S1_12	0,31	0,32	0,32	0,31	0,31	0,31	0,0055	1,767	15,1
S2_1	0,48	0,51	0,51	0,52	0,50	0,50	0,0152	3,009	24
S2_2	0,46	0,51	0,47	0,49	0,47	0,48	0,0200	4,167	25,3
S2_3	0,46	0,45	0,46	0,48	0,47	0,46	0,0114	2,457	24,9
S2_4	0,46	0,49	0,52	0,44	0,45	0,47	0,0327	6,930	24,2
S2_5	0,49	0,48	0,49	0,48	0,47	0,48	0,0084	1,736	24,0
S2_6	0,46	0,50	0,50	0,51	0,49	0,49	0,0192	3,910	24,6
S2_7	0,48	0,49	0,48	0,47	0,46	0,48	0,0114	2,395	24,5
L1_1	1,45	1,50	1,20	1,67	1,22	1,41	0,1984	14,092	19,3
L1_2	0,39	1,49	1,53	1,42	1,50	1,27	0,4914	38,812	19,7
L1_3	1,10	1,35	1,55	1,48	1,15	1,33	0,1978	14,918	18,6
L1_4	1,42	1,65	1,27	1,47	1,36	1,43	0,1419	9,894	19,4
L1_5	1,62	1,61	1,54	1,33	1,45	1,51	0,1214	8,043	18,3
L2	1,61	1,71	1,51	1,71	1,73	1,65	0,0932	5,633	23,6
L3	1,84	1,61	1,21	1,35	2,30	1,66	0,4310	25,933	24,4

gdje je: d - debljina ojačala, d_s - srednja vrijednost debljina ojačala, σ - standardna devijacija, V - koeficijent varijacije, m - masa ojačala

Tablica 18. Plošna masa, broj niti osnove i potke/cm, količina vlage i prosječna debljina ojačala

UZORAK	Plošna masa	Broj niti osnove i potke/cm		Količina vlage			Prosječna debljina	
	$PM [g/m^3]$	Osnova	Potka	$m_k [g]$	$m_{as} [g]$	$R [\%]$	$d [mm]$	$V [\%]$
S1, 2D	313,86	3	3	3,1386	3,1309	0,24	0,31	2,238
S2, 2D	528,84	2	2	5,2884	5,2786	1,86	0,48	3,515
L1, 2D	418,34	4	3	4,1834	3,8764	7,92	1,39	17,152
L2, UD	450,00	2	4	-	-	-	1,65	5,633
L3, 2D	550,00	2	2	-	-	-	1,66	25,933

gdje je: PM - plošna masa, m_k - masa kondicioniranog uzorka, m_{as} - masa apsolutno suhog uzorka, R - repriza, d - prosječna debljina, V - koeficijent varijacije

Tehnička lanena vlakna su za razliku od monofilamentnih staklenih vlakana koja se uobičajeno primjenjuju za izradu roving pređe, diskontinuirana i različitih duljina. Gustoća lanenih vlakana znatno je manja od gustoće staklenih vlakana, a time su ona i lakša. Stoga je za lanenu roving pređu utrošeno više vlakana nego u staklenoj pređi iste finoće, što lanenu pređu definiranog promjera čini debljom. Bitno je napomenuti da su staklena vlakna filamentna, jednolikog kružnog poprečnog presjeka što uvjetuje i veću jednolikost staklene roving pređe. Lanena vlakna su vlasasta, nejednolikog poprečnog presjeka, neravnomjernije raspoređena po promjeru pređe, što uvelike utječe na vlačna svojstva lanene roving pređe, ali i veću utvrđenu varijabilnost (tablica 1). Uspoređujući vrijednosti vlačnih svojstva staklene i lanene roving pređe jednake finoće vidljivo je da je prekidna istezljivost obje gotovo jednaka, dok su vrijednosti prekidne sile i izračunate vlačne čvrstoće nešto niže kod lanene roving pređe.

Laboratorijski izrađena lanena tkana ojačala se na temelju sličnih konstrukcijskih karakteristika mogu usporediti s ojačalima otkanim iz staklene roving pređe. Uspoređivana su ona izrađena iz pređe od lanenih i staklenih vlakana jednake duljinske mase (finoće), dakle S1/L1 i S2/L3. Plošna masa i debljina tkanog ojačala iz lanene roving pređe je veća od plošne mase i debljine ojačala iz staklene pređe, na što utječe i veća debljina lanene roving pređe, ali i nešto veća gustoća niti osnove u lanenom ojačalu koja je uvjetovana načinom tkanja. Također je kod lanenog tkanog ojačala utvrđena nešto veća varijabilnost debljine uvjetovana većom nejednolikošću strukture na

makro, ali i mikro razini. Utvrđena ravnotežna vlaga je kod ojačala iz lanenih vlakana očekivano veća što ukazuje i na njihovu veću hidrofilnost i higroskopnost.

4.2. Rezultati karakterizacije kompozitnih ploča

Rezultati mjerenja debljine i mase kompozitnih ploča odabranih za daljnju karakterizaciju, te rezultati izračuna masenih i volumnih udjela vlakana dani su u tablicama 19, 20 i 21.

Tablica 19. Debljina kompozitnih ploča

UZORAK	<i>d</i> [mm]					<i>d_s</i> [mm]	<i>V</i> [%]
	1	2	3	4	5		
S1_IV.	2,74	3,45	3,73	3,72	3,04	3,34	11,675
L1_I.	4,84	5,69	5,67	5,20	5,07	5,29	6,340
S1L1_I.	3,73	3,20	3,68	4,25	3,69	3,71	8,967
S1L1_II.	2,99	4,29	2,35	3,33	3,45	3,28	19,273
S2_II.	3,36	3,66	3,37	3,14	3,00	3,31	6,811
S2L3	4,38	3,2	4,22	4,58	4,36	4,15	11,758
S2L2	4,89	5,33	4,16	4,12	3,68	4,44	13,348
S2L1_I.	3,50	3,96	3,92	4,45	3,85	3,94	7,727

gdje je: *d*- debljina kompozitne ploče, *d_s*- srednja vrijednost debljina kompozitne ploče, *V*- koeficijent varijacije

Očekivana (željena) debljina kompozitnih ploča je bila 4 mm. Po skrutnjavanju smole, mjerenjem debljine ploča najveće odstupanje utvrđeno je kod ploče ojačane s dva sloja lanenog ojačala L1(ploča L1_I.), što je bilo i za očekivati, s obzirom na to da je u lanenih tkanih ojačala utvrđena veća hidrofilnost i bubrenje. Kod kompozitnih ploča ojačanih s dva sloja staklenog ojačala značajnih odstupanja nema (ploče S1_IV. i S2_II.). Kod hibridnih kompozitnih ploča ojačanih s dva sloja ojačala (ploče S1L1_I., S2L3, S2L2 i S2L1_I.) vidljiv je utjecaj lana na povećanje debljine, dok kod hibridne ploče ojačane s tri sloja ojačala (2 sloja stakla i jedan sloj lana, S1L1_II) takav utjecaj nije zamjetan.

U tablici 20 su prikazane mase kompozitnih ploča, mase primijenjenih ojačala i mase smole koje su korištene za izračun masenih i volumnih udjela vlakana u kompozitnim materijalima, dok su u tablici 21 prikazani izračunati maseni udjeli lanenih i staklenih vlakana u kompozitnim materijalima, te ukupni maseni udio vlakana i volumni udio vlakana u kompozitnim pločama.

Tablica 20. Masa kompozitnih ploča, masa ojačala i masa matrice

UZORAK	m_L [g]	m_S [g]	m_V [g]	m_M [g]	m_K [g]
S1_IV.	-	30,2	30,2	173,5	203,7
L1_I.	37,9	-	37,9	227,3	265,2
S1L1_I.	19,7	15,4	35,1	173,2	208,3
S1L1_II.	19,4	29,9	49,3	167,1	216,4
S2_II.	-	49,1	49,1	171,7	220,8
S2L3	24,4	24,6	49,0	209,5	258,5
S2L2	23,6	24,0	47,6	193,5	241,1
S2L1	18,3	24,5	42,8	179,9	222,7

gdje je: m_L – masa lana, m_S - masa stakla, m_V - masa vlakana, m_M - masa matrice, m_K - masa kompozitne ploče

Kako su za izradu prve četiri kompozitne ploče primijenjena ojačala izrađena iz pređe stakla i lana gotovo jednake finoće (2S1/2L1/1S1 i 1L_1), utvrđena masa vlakana u prve tri ploče je usporediva, dok je u četvrte ploče veća jer je ojačana s 3 sloja ojačala (dva sloja stakla S1 i jednim slojem lana L1). S povećanjem duljinske mase primijenjene pređe, masa vlakana u kompozitu se povećava (S2_II, S2L3, S2L2, S2L1).

Tablica 21. Maseni i volumni udio vlakana u kompozitu

UZORAK	W_L [%]	W_S [%]	W_V [%]	V_V [%]
S1_IV.	-	14,83	14,83	6,99
L1_I.	14,29	-	14,29	11,23
S1L1_I.	9,46	7,39	16,85	11,08
S1L1_II.	8,96	13,82	22,78	14,18
S2_II.	-	22,24	22,24	10,98
S2L3	9,44	9,52	18,96	12,20
S2L2	9,79	9,95	19,74	12,74
S2L1	8,22	11,00	19,22	11,97

gdje je: W_L - maseni udio lana, W_S - maseni udio stakla, W_V - maseni udio vlakana, V_V - volumni udio vlakana

Prve 3 kompozitne ploče (S1_IV., L1_I. i S1L1_I.) ojačane su s 2 sloja ojačala i približno su bliskih masenih udjela vlakana, što omogućuje njihovu lakšu usporedbu. Četvrti uzorak (S1L1_II.) ima nešto veći maseni udio vlakana (22,24 %) jer je ojačan s 3 sloja tkanih ojačala. S obzirom na to da su staklena tkana ojačala jednolikije strukture, manje debljine i izrađena od težih vlakna veće gustoće, a lanena ojačala izgrađuje veća količina lakših vlakana po jedinici volumena, jasno je da je volumni udio uzorka 2 (L1_I.) ojačanog s 2 sloja lanenog ojačala je veći od volumnog udjela vlakana kod uzorka 1 (S1_IV.) ojačanog s 2 sloja staklenog ojačala. Navedeni utjecaj je zamjetan i u ostalih hibridnih ploča odabranih za ispitivanje.

4.2.2. Mehanička svojstva

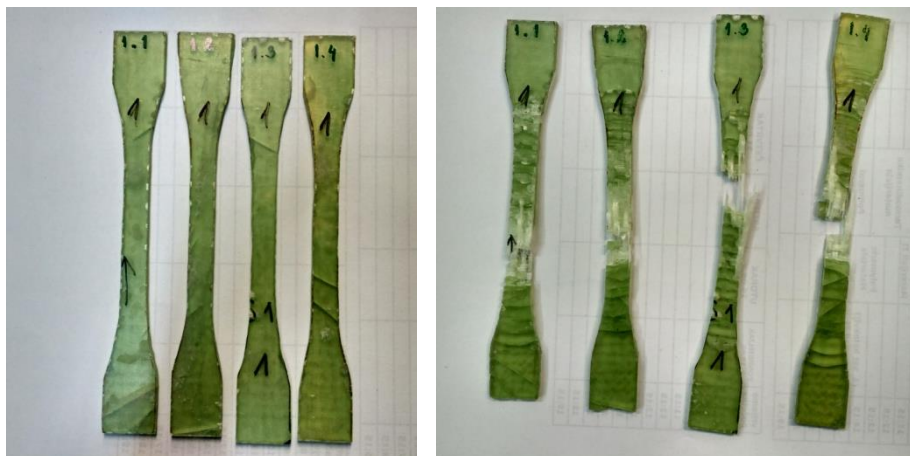
Zbog opsežnosti ispitivanja za daljnju analizu i usporedbu odabrane su prve četiri kompozitne ploče, ojačane tkanim ojačalima izrađenim iz pređe finoće 600 tex-a (S1_IV.- ojačana s dva komada staklenog ojačala oznake S1, L1_I.- ojačana s dva komada lanenog ojačala oznake L1, S1L1_I.- ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1 i S1L1_II.- ojačana s dva komada staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1).

4.2.2.1. Vlačna čvrstoća

4.2.2.1.1. Kompozitna ploča S1_IV.

Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće prikazane su na slici 33. Prilikom rezanja epruveti kompozit je popucao na nekim mjestima pa se prilikom tumačenja rezultata

ovaj podatak treba uzeti u obzir. Na epruveti broj 2 pukotine su najmanje vidljive, dok je epruveta 4 popucala najviše.



Slika 33. Epruvete kompozitne ploče S1_IV. za ispitivanje vlačne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

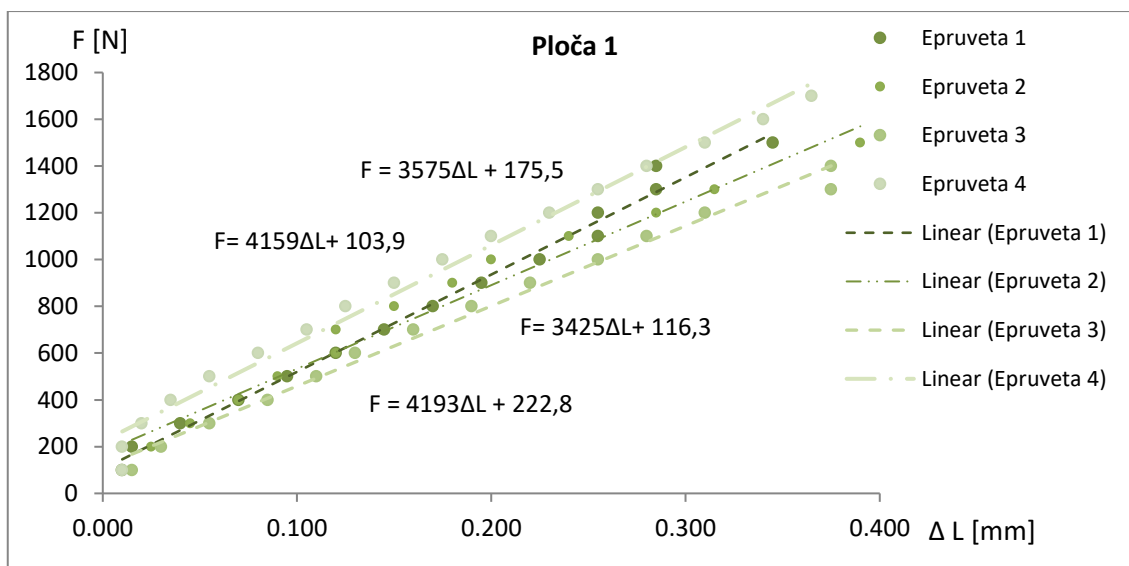
Epruvete su podvrgnute statičko-rasteznom ispitivanju. Mjerno područje je 4800N, brzina opterećivanja 5mm/min, a razmak između stezaljki 50mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 22.

Tablica 22. Produljenja pri opterećenju za kompozitnu ploču S1_IV.

	Epruveta			
	1	2	3	4
\bar{s} [mm]	10,03	10,27	10,00	9,89
d [mm]	3,39	3,57	3,23	3,78
S_0 [mm ²]	34,00	36,66	32,30	37,38
F [N]	ΔL [mm]			
100	0,010	0,015	0,015	0,010
200	0,015	0,025	0,030	0,010
300	0,040	0,045	0,055	0,020
400	0,070	0,070	0,085	0,035
500	0,095	0,090	0,110	0,055
600	0,120	0,120	0,130	0,080
700	0,145	0,120	0,160	0,105
800	0,170	0,150	0,190	0,125
900	0,195	0,180	0,220	0,150
1000	0,225	0,200	0,255	0,175
1100	0,255	0,240	0,280	0,200
1200	0,255	0,285	0,310	0,230
1300	0,285	0,315	0,375	0,255
1400	0,285	0,375	0,375	0,280
1500	0,345	0,390		0,310
1600				0,340
1700				0,365
F_{max} [N]	2400	2200	1620	2000
R_m [Mpa]	70,58	60,00	50,15	53,50

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, ΔL - produljenje, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_m - rastezna čvrstoća

Dijagram na slici 34 prikazuje ovisnosti produljenja o opterećenju. Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 23 iz kojih se iščitavaju nagibi pravaca potrebni za izračun modula elastičnosti.



Slika 34. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1_IV.

Tablica 23. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1_IV.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 4159\Delta L + 103,9$
2	$F = 3575\Delta L + 175,5$
3	$F = 3425\Delta L + 116,3$
4	$F = 4193\Delta L + 222,8$

U tablici 24 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču S1_IV..

Tablica24. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorak S1_IV.

UZORAK	\bar{s} [mm]	d [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [Mpa]	R_m [Mpa]
1	10,03	3,39	34,00	4159	50	2400	6115,871	70,58
2	10,27	3,57	36,66	3575	50	2200	4875,368	60,00
3	10,00	3,23	32,30	3425	50	1620	5301,858	50,15
4	9,89	3,78	37,38	4193	50	2000	5607,984	53,50
\bar{x}	10,048	3,493	35,087	3838	50	2055	5469,192	58,561
st. dev	0,1601	0,2367	2,3600	395,3075	-	332,8163	522,1547	8,9990

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, $F/\Delta L$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, F_{max} - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, R_m -rastezna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.1.2. Kompozitna ploča L1_I.

Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču L1_I. prikazane su na slici 35.



Slika 35. Epruvete kompozitne ploče L1_I. za ispitivanje vlačne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

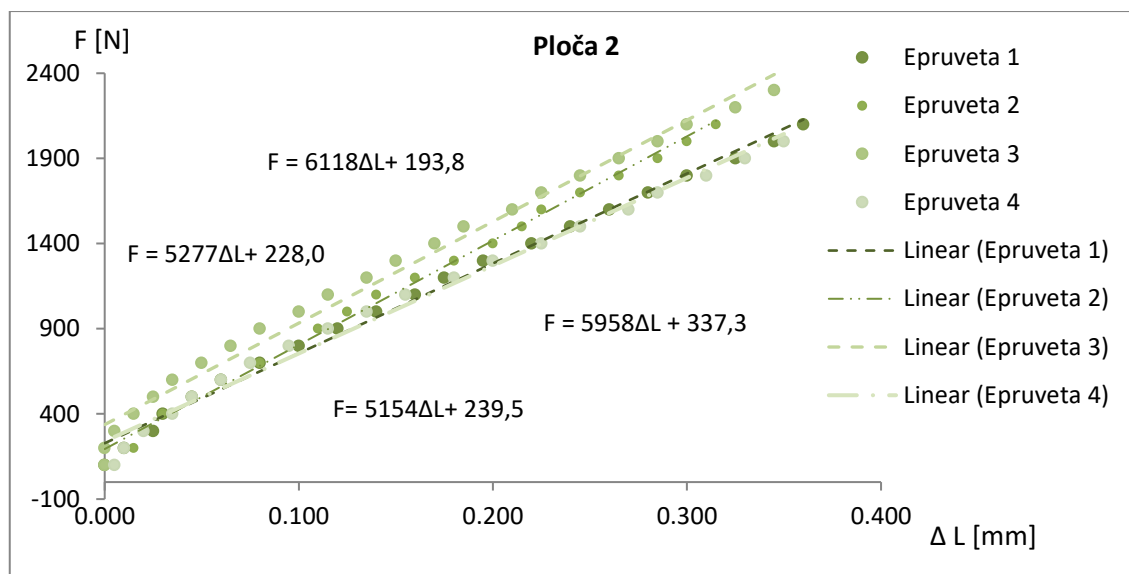
Epruvete su podvrgnute statičko-rasteznom ispitivanju. Mjerno područje je 4800N, brzina opterećivanja 5mm/min, a razmak između stezaljki 50mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 25.

Tablica 25. Produljenja pri opterećenju za kompozitnu ploču L1_I.

	Epruveta			
	1	2	3	4
\bar{s} [mm]	10,22	10,26	10,03	10,09
d [mm]	4,27	4,53	4,62	4,59
S_0 [mm ²]	43,64	46,48	46,34	46,31
F [N]	ΔL [mm]			
100	0	0	0	0,005
200	0,010	0,015	0	0,010
300	0,025	0,020	0,005	0,020
400	0,030	0,030	0,015	0,035
500	0,045	0,045	0,025	0,045
600	0,060	0,060	0,035	0,060
700	0,080	0,080	0,050	0,075
800	0,100	0,095	0,065	0,095
900	0,120	0,110	0,080	0,115
1000	0,140	0,125	0,100	0,135
1100	0,160	0,140	0,115	0,155
1200	0,175	0,160	0,135	0,180
1300	0,195	0,180	0,150	0,200
1400	0,220	0,200	0,170	0,225
1500	0,240	0,215	0,185	0,245
1600	0,260	0,225	0,210	0,270
1700	0,280	0,245	0,225	0,285
1800	0,300	0,265	0,245	0,310
1900	0,325	0,285	0,265	0,330
2000	0,345	0,300	0,285	0,350
2100	0,360	0,315	0,300	
2200			0,325	
2300			0,345	
F_{max} [N]	2560	2180	2360	2380
R_m [Mpa]	58,66	46,90	50,93	51,39

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, ΔL - produljenje, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_m - rastezna čvrstoća

Dijagram na slici 36 prikazuje ovisnosti produljenja o opterećenju. Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 26 iz kojih se iščitavaju nagibi pravaca potrebni za izračun modula elastičnosti.



Slika 36. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za L1_I.

Tablica 26. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za L1_I.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 5277\Delta L + 228,0$
2	$F = 6118\Delta L + 193,8$
3	$F = 5958\Delta L + 337,3$
4	$F = 5154\Delta L + 239,5$

U tablici 27 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču L1_I.

Tablica 27. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorak L1_I.

UZORAK	\bar{s} [mm]	d [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [Mpa]	R_m [Mpa]
1	10,22	4,27	43,64	5277	50	2560	6046,142	58,66
2	10,26	4,53	46,48	6118	50	2180	6581,637	46,90
3	10,03	4,62	46,34	5958	50	2360	6428,766	50,93
4	10,09	4,59	46,31	5154	50	2380	5564,300	51,39
\bar{x}	10,150	4,503	45,692	5627	50	2370	6157,229	52
st. dev	0,1080	0,1595	1,3705	481,9650	-	155,3491	453,7777	4,8949

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, $F/\Delta L$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, F_{max} - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, R_m -rastezna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.1.3. Kompozitna ploča S1L1_I.

Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču S1L1_I. prikazane su na slici 37.



Slika 37. Epruvete kompozitne ploče S1L1_I. za ispitivanje vlačne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

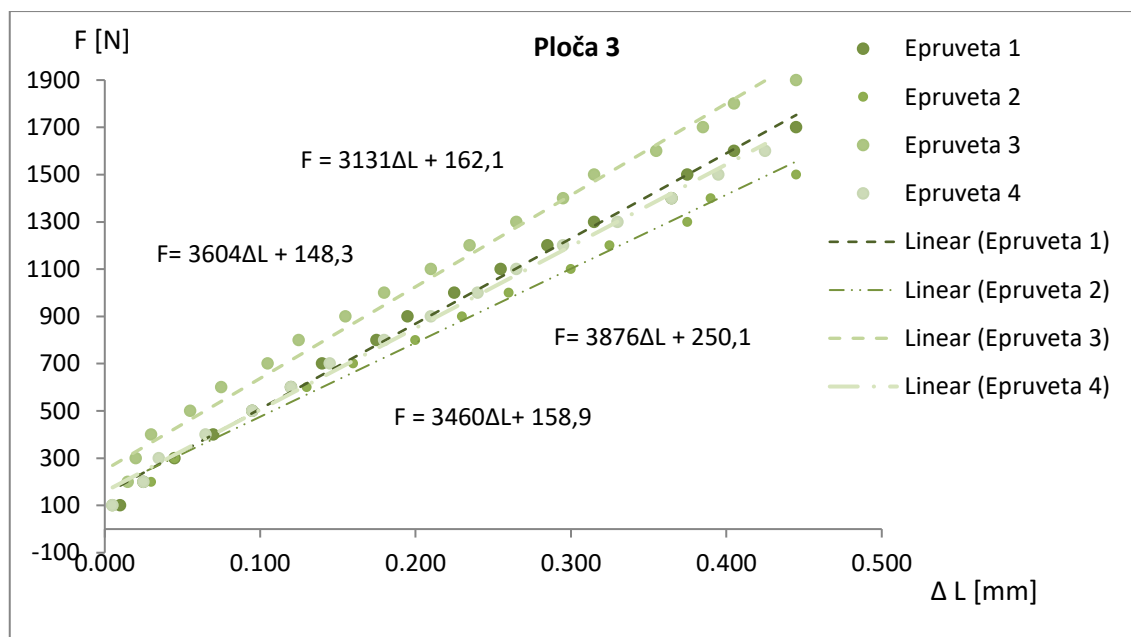
Epruvete su podvrgnute statičko-rasteznom ispitivanju. Mjerno područje je 4800N, brzina opterećivanja 5mm/min, a razmak između stezaljki 50mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 28.

Tablica 28. Produljenja pri opterećenju za kompozitnu ploču S1L1_I.

	Epruveta			
	1	2	3	4
\bar{s} [mm]	9,92	10,11	10,24	10,23
d [mm]	3,15	3,07	3,06	3,08
S_0 [mm ²]	31,25	31,04	31,33	31,51
F [N]	ΔL [mm]			
100	0,010	0,005	0,005	0,005
200	0,025	0,030	0,015	0,025
300	0,045	0,045	0,020	0,035
400	0,070	0,065	0,030	0,065
500	0,095	0,095	0,055	0,095
600	0,120	0,130	0,075	0,120
700	0,140	0,160	0,105	0,145
800	0,175	0,200	0,125	0,180
900	0,195	0,230	0,155	0,210
1000	0,225	0,260	0,180	0,240
1100	0,255	0,300	0,210	0,265
1200	0,285	0,325	0,235	0,295
1300	0,315	0,375	0,265	0,330
1400	0,365	0,390	0,295	0,365
1500	0,375	0,445	0,315	0,395
1600	0,405		0,355	0,425
1700	0,445		0,385	
1800			0,405	
1900			0,445	
F_{max} [N]	1780	1600	2000	1900
R_m [Mpa]	56,96	51,55	63,83	60,30

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, ΔL - produljenje, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_m - rastezna čvrstoća

Dijagram na slici 38 prikazuje ovisnosti produljenja o opterećenju. Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 29 iz kojih se iščitavaju nagibi pravaca potrebni za izračun modula elastičnosti.



Slika 38. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_I.

Tablica 29. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_I.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 3604\Delta L + 148,3$
2	$F = 3131\Delta L + 162,1$
3	$F = 3876\Delta L + 250,1$
4	$F = 3460\Delta L + 158,9$

U tablici 30 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču S1L1_I.

Tablica 30. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorak S1L1_I.

UZORAK	\bar{s} [mm]	d [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [Mpa]	R_m [Mpa]
1	9,92	3,15	31,25	3604	50	1780	5766,769	56,96
2	10,11	3,07	31,04	3131	50	1600	5043,866	51,55
3	10,24	3,06	31,33	3876	50	2000	6184,896	63,83
4	10,23	3,08	31,51	3460	50	1900	5490,599	60,30
\bar{x}	10,125	3,090	31,282	3518	50	1820	5622,620	58,160
st. dev	0,1489	0,0408	0,1957	310,2111	0,0000	172,0465	479,3447	5,2237

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, $F/\Delta L$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, F_{max} - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, R_m -rastezna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.1.4. Kompozitna ploča SIL1_II.

Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču SIL1_II. prikazane su na slici 39



Slika 39. Epruvete kompozitne ploče SIL1_II. za ispitivanje vlačne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

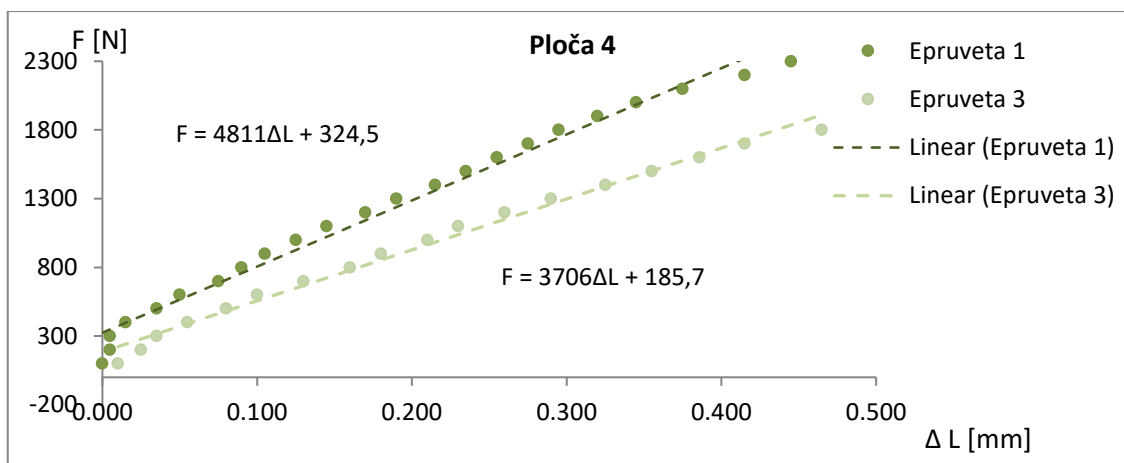
Epruvete su podvrgnute statičko-rasteznom ispitivanju. Mjerno područje je 4800N, brzina opterećivanja 5mm/min, a razmak između stezaljki 50mm. Epruveta 2 nije jednake debljine po cijeloj dužini pa ekstenzometar ne može zakvačiti epruvetu s oba ticala, to znači da je mjerenje produljenja nemoguće. Epruveta 3 također pa je mjereno produljenje na rubovima epruvete, a ne na površini kako je uobičajeno. Epruveta 4 je mjerena po površini ali desna strana ekstenziometra ne dira ticalima površinu. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 31.

Tablica 31. Produljenja pri opterećenju za kompozitnu ploču S1L1_II.

	Epruveta			
	1	2	3	4
\bar{s} [mm]	10,44	10,16	10,00	10,22
d [mm]	3,77	2,85	3,45	2,69
S_0 [mm ²]	39,36	28,96	34,50	27,49
F [N]	ΔL [mm]			
100	0		0,010	
200	0,005		0,025	
300	0,005		0,035	
400	0,015		0,055	
500	0,035		0,080	
600	0,050		0,100	
700	0,075		0,130	
800	0,090		0,160	
900	0,105		0,180	
1000	0,125		0,210	
1100	0,145		0,230	
1200	0,170		0,260	
1300	0,190		0,290	
1400	0,215		0,325	
1500	0,235		0,355	
1600	0,255		0,386	
1700	0,275		0,415	
1800	0,295		0,465	
1900	0,320			
2000	0,345			
2100	0,375			
2200	0,415			
2300	0,445			
F_{max} [N]	2460	2280	1960	1960
R_m [Mpa]	62,50	78,74	56,81	71,29

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, ΔL - produljenje, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_m - rastezna čvrstoća

Dijagram na slici 40 prikazuje ovisnosti produljenja o opterećenju. Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 32 iz kojih se iščitavaju nagibi pravaca potrebni za izračun modula elastičnosti.



Slika 40. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_II.

Tablica 32. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_II.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 4811\Delta L + 324,5$
3	$F = 3706\Delta L + 185,7$

U tablici 33 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za kompozitnu ploču S1L1_II.

Tablica 33. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorak S1L1_II.

UZORAK	\bar{s} [mm]	d [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [Mpa]	R_m [Mpa]
1	10,44	3,77	39,36	4811	50	2460	6111,721	62,50
3	10,00	3,45	34,50	3706	50	1960	5371,014	56,81
\bar{x}	10,220	3,610	36,929	4258,500	50	2210	5765,731	59,655
st. dev	0,3111	0,2263	3,4357	781,3530	0,0000	353,5534	523,7585	4,0234

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, $F/\Delta L$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, F_{max} - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, R_m -rastezna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

U tablici 34 dani su skupni rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na sve četiri ispitivane kompozitne ploče.

Tablica 34. Skupni rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

UZORAK	\bar{s} [mm]	d [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [Mpa]	R_m [Mpa]
S1_IV.	10,048	3,493	35,087	3838	50	2055	5469,19	58,56
st. dev.	0,160	0,237	2,360	395,308	-	332,816	522,155	8,999
V [%]	1,593	6,776	6,726	10,300	-	16,195	9,547	15,367
L1_I.	10,15	4,503	45,692	5627	50	2370	6157,23	52,00
st. dev.	0,108	0,160	1,371	481,965	-	155,349	453,778	4,895
V [%]	1,064	3,542	2,999	8,565	-	6,555	7,370	9,413
S1L1_I.	10,125	3,09	31,282	3518	50	1820	5622,62	58,16
st. dev.	0,149	0,041	0,196	310,211	-	172,047	479,345	5,224
V [%]	1,471	1,320	0,626	8,818	-	9,453	8,525	8,982
S1L1_II.	10,22	3,61	36,929	4258,5	50	2210	5765,73	59,65
st. dev.	0,311	0,226	3,436	781,353	-	353,553	523,759	4,023
V [%]	3,044	6,269	9,304	18,348	-	15,998	9,084	6,745

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, $F/\Delta L$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, F_{max} - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, R_m -rastezna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija, V - koeficijent varijacije

Analizom rezultata vlačnih svojstava 4 odabrane kompozitne ploče ojačanih s dvosmjerno orijentiranim (2D) tkanim ojačalom iz lanenih i staklenih vlakana je utvrđeno:

- da kompozitna ploča ojačana s dva sloja lanenog ojačala (L1_I.) i kompozitna ploča ojačana s dva sloja staklenog ojačala (S1_IV.) pokazuju gotovo iste vrijednosti prekidne sile uslijed vlačnog opterećenja, dakle i gotovo jednaku opteretivost,
- pri tom valja istaknuti da su kod druge kompozitne ploče ojačane s dva sloja lanenog ojačala (L1_I.) utvrđene najviše vrijednosti maksimalne sile i modula elastičnosti u usporedbi s ostalim,
- kod sve četiri kompozitne ploče (S1_IV.- ojačana s dva komada staklenog ojačala oznake S1, L1_I.- ojačana s dva komada lanenog ojačala oznake L1, S1L1_I.- ojačana s jednim komadom staklenog ojačala S1 i jednim komadom lanenog ojačala L1 i S1L1_II.- ojačana s dva komada staklenog ojačala S1 i

jednim komadom lanenog ojačala L1) utvrđene su usporedive vrijednosti modula elastičnosti,

- da se dodatkom dodatnog sloja staklenog ojačala (uzorak 4, S1L1_II.) značajno ne povećava vrijednost prekidne sile i modula elastičnosti hibridne kompozitne ploče,
- da su utvrđene vrijednosti koeficijenta varijacije relativno niske što ukazuje na malo rasipanje mjernih rezultata ispitivanih svojstava, ali i ravnomjernost izrađenih ploča.

4.2.2.2. Savojna čvrstoća

4.2.2.2.1. Kompozitna ploča S1_IV.

Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće prikazane su na slici 41. Uzorke smo ispitivali s naličja budući da su vlakna bliže licu pa se pretpostavilo da će uzroci pokazati bolja savojna svojstva ako se ispituju s naličja.



Slika 41. Epruvete kompozitne ploče S1_IV. za ispitivanje savojne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

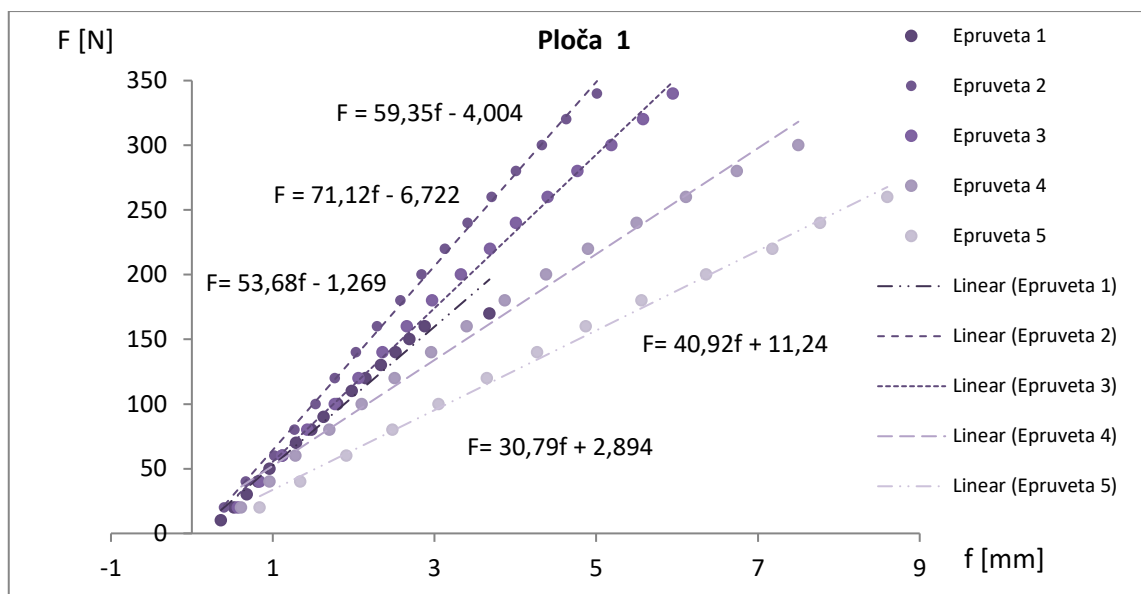
U tablici 35 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za kompozitnu ploču S1_IV. Za prvu epruvetu bilježili smo progibe u razmaku od 10 N, no kako bi pratili ponašanje epruvete u dužem intervalu opterećenja ostale smo bilježili u razmaku od 20 N. Zabilježeni su progibi za interval do 170N, odnosno 340 N.

Tablica 35. Progibi pri opterećenjima za uzorak S1_IV.

		Epruveta				
		1	2	3	4	5
	\check{s} [mm]	15,36	15,17	15,45	15,26	15,25
	d [mm]	2,73	3,00	2,82	2,68	2,49
	S_0 [mm ²]	41,93	45,51	43,57	40,90	37,97
F_1 [N]	$F_{2,3,4,5}$ [N]	f [mm]				
10	20	0,36	0,40	0,57	0,61	0,84
20	40	0,52	0,67	0,84	0,96	1,34
30	60	0,68	1,02	1,12	1,28	1,91
40	80	0,82	1,27	1,43	1,70	2,48
50	100	0,96	1,53	1,77	2,10	3,05
60	120	1,12	1,77	2,06	2,51	3,65
70	140	1,29	2,03	2,36	2,96	4,27
80	160	1,48	2,29	2,66	3,40	4,87
90	180	1,63	2,58	2,97	3,87	5,56
100	200	1,80	2,84	3,33	4,38	6,36
110	220	1,98	3,13	3,69	4,90	7,18
120	240	2,15	3,41	4,01	5,50	7,77
130	260	2,34	3,71	4,4	6,11	8,60
140	280	2,52	4,01	4,77	6,74	
150	300	2,69	4,33	5,19	7,50	
160	320	2,88	4,63	5,58		
170	340	3,68	5,01	5,95		
	F_{max} [N]	350	434	404	284	268
	R_{ms} [MPa]	201,79	209,80	217,02	171,02	187,07
	L [mm]	44				

gdje je: \check{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, f - progib, F_1 -sile za prvu epruvetu, $F_{2,3,4,5}$ - sile za epruvete od 2 do 5, F_{max} - maksimalna sila, R_{ms} - savojna čvrstoća, L - razmak između stezaljki

Bilo je potrebno nacrtati dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju kako bi se mogao odrediti nagib pravca potreban za izračun savojnog modula (sl. 42). Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 36.



Slika 42. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1_IV.

Tablica 36. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1_IV.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 53,68f - 1,269$
2	$F = 71,12f - 6,722$
3	$F = 59,35f - 4,004$
4	$F = 40,92f + 11,24$
5	$F = 30,79f + 2,894$

U tablici 37. prikazani su rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.

Tablica 37. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak S1_IV.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [Mpa]	R_{ms} [Mpa]	F_{max} [N]
1	15,36	2,73	53,68	44	3657,90	201,79	350
2	15,17	3,00	71,12	44	3697,77	209,80	434
3	15,45	2,82	59,35	44	3647,90	217,02	404
4	15,26	2,68	40,92	44	2966,71	171,02	284
5	15,25	2,49	30,79	44	2785,09	187,07	268
x	15,30	2,74	51,17	44	3351,07	197,34	348
st. dev.	0,108	0,187	15,745	0	438,896	18,443	72,512

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, $\Delta F/\Delta f$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, E_s - savojni modul elastičnosti, R_{ms} -savojna čvrstoća, F_{max} - maksimalna sila, x - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.2.2. Kompozitna ploča L1_I.

Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće prikazani su na slici 43. Uzorke smo ispitivali s naličja budući da su vlakna bliže licu pa će uzroci pokazati bolja savojna svojstva ako se ispituju s naličja.



Slika 43. Epruvete kompozitne ploče L1_I. za ispitivanje savojne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

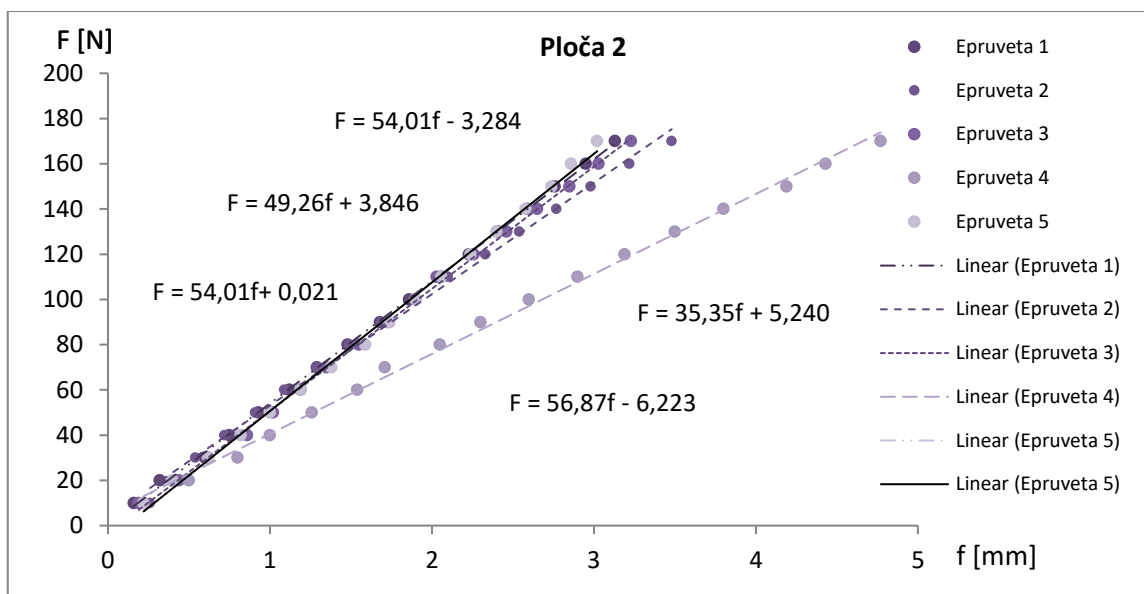
U tablici 38 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za kompozitnu ploču L1_I. Zabilježeni su progibi za interval od 10 do 170 N, a bilježena je vrijednost progiba svakih 10N..

Tablica 38. Progibi pri opterećenjima za uzorak L1_I.

	Redni broj epruvete				
	1	2	3	4	5
\bar{s} [mm]	15,31	15,27	15,12	15,41	15,49
d [mm]	4,66	4,37	4,51	3,82	4,48
S_0 [mm ²]	71,34	66,73	68,19	58,87	69,40
F [N]	f [mm]				
10	0,16	0,26	0,19	0,22	0,22
20	0,32	0,42	0,44	0,50	0,40
30	0,60	0,54	0,62	0,80	0,62
40	0,75	0,72	0,86	1,00	0,82
50	0,93	0,91	1,02	1,26	1,00
60	1,12	1,09	1,19	1,54	1,19
70	1,29	1,29	1,35	1,71	1,38
80	1,48	1,49	1,55	2,05	1,59
90	1,68	1,69	1,73	2,30	1,74
100	1,86	1,90	1,90	2,60	1,90
110	2,06	2,10	2,03	2,90	2,06
120	2,23	2,33	2,26	3,19	2,24
130	2,41	2,54	2,46	3,50	2,40
140	2,59	2,77	2,65	3,80	2,58
150	2,76	2,98	2,85	4,19	2,74
160	2,95	3,22	3,03	4,43	2,86
170	3,13	3,48	3,23	4,77	3,02
F_{max} [N]	310	270	248	200	312
R_{ms} [MPa]	97,90	97,22	84,67	93,39	105,37
L [mm]	70				

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, f - progib, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_{ms} - savojna čvrstoća, L - razmak između stezaljki

Bilo je potrebno nacrtati dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju kako bi se mogao odrediti nagib pravca potreban za izračun savojnog modula (sl. 44). Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 39.



Slika 44. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za L1_I.

Tablica 39. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za L1_I.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 54,01f + 0,021$
2	$F = 49,26f + 3,846$
3	$F = 54,01f - 3,284$
4	$F = 35,35f + 5,240$
5	$F = 56,87f - 6,223$

U tablici 40 prikazani su rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.

Tablica 40. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak L1_I.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [Mpa]	R_{ms} [Mpa]	F_{max} [N]
1	15,31	4,66	54,01	70	2989,34	97,90	310
2	15,27	4,37	49,26	70	3314,71	97,22	270
3	15,12	4,51	54,01	70	3339,08	84,67	248
4	15,41	3,82	35,35	70	3528,83	93,39	200
5	15,49	4,48	56,87	70	3501,32	105,37	312
\bar{x}	15,32	4,37	49,90	70	3334,66	95,71	268
st. dev.	0,141	0,323	8,580	0	215,140	7,544	46,712

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, $\Delta F/\Delta f$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, E_s - savojni modul elastičnosti, R_{ms} -savojna čvrstoća, F_{max} - maksimalna sila, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.2.3. Kompozitna ploča S1L1_I.

Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće prikazani su na slici 45. Uzorke smo ispitivali s lica jer su staklena vlakna smještena bliže naličju. Staklena vlakna mogu podnijeti veća opterećenja pa ga stavljamo u položaj gdje su veća opterećenja.



Slika 45. Epruvete kompozitne ploče S1L1_I. za ispitivanje savojne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

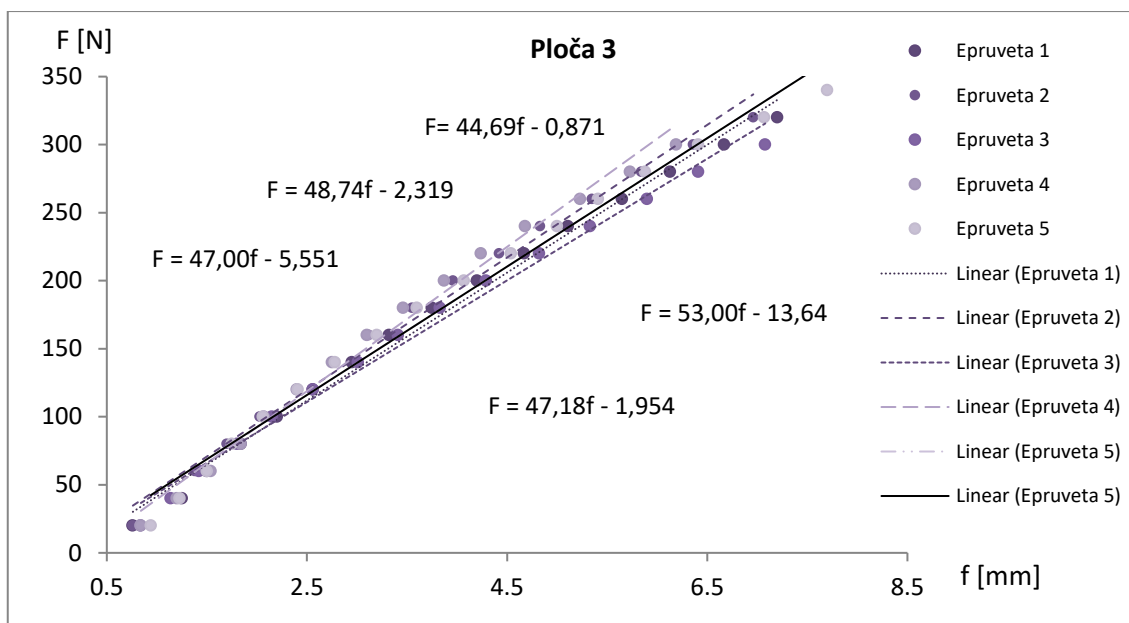
U tablici 41 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za kompozitnu ploču S1L1_I. Zabilježeni su progibi za interval od 20 do 3400 N, a bilježena je vrijednost progiba svakih 20N..

Tablica 41. Progibi pri opterećenjima za uzorak S1L1_I.

	Redni broj epruvete				
	1	2	3	4	5
\bar{s} [mm]	15,30	15,22	15,26	15,15	15,21
d [mm]	3,40	2,96	3,02	3,08	3,07
S_0 [mm ²]	52,02	45,05	46,09	46,66	46,69
F [N]	f [mm]				
20	0,76	0,76	0,84	0,84	0,94
40	1,25	1,15	1,14	1,20	1,23
60	1,50	1,38	1,42	1,54	1,50
80	1,84	1,70	1,80	1,84	1,75
100	2,20	2,03	2,15	2,07	2,06
120	2,56	2,40	2,56	2,40	2,41
140	2,95	2,75	3,01	2,75	2,78
160	3,32	3,12	3,41	3,10	3,20
180	3,75	3,55	3,83	3,46	3,60
200	4,20	3,96	4,29	3,87	4,07
220	4,67	4,42	4,82	4,24	4,54
240	5,11	4,83	5,33	4,68	5,00
260	5,65	5,35	5,90	5,23	5,41
280	6,13	5,84	6,41	5,73	5,88
300	6,67	6,36	7,08	6,19	6,41
320	7,20	6,96			7,07
340					7,70
F_{max} [N]	336	330	314	320	342
R_{ms} [MPa]	142,48	185,60	169,21	166,99	178,93
L [mm]	50				

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, f - progib, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_{ms} - savojna čvrstoća, L - razmak između stezaljki

Bilo je potrebno nacrtati dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju kako bi se mogao odrediti nagib pravca potreban za izračun savojnog modula (sl. 46). Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 42.



Slika 46. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_I.

Tablica 42. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_I.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 47,00f - 5,551$
2	$F = 48,74f - 2,319$
3	$F = 44,69f - 0,871$
4	$F = 53,00f - 13,64$
5	$F = 47,18f - 1,954$

U tablici 43 prikazani su rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.

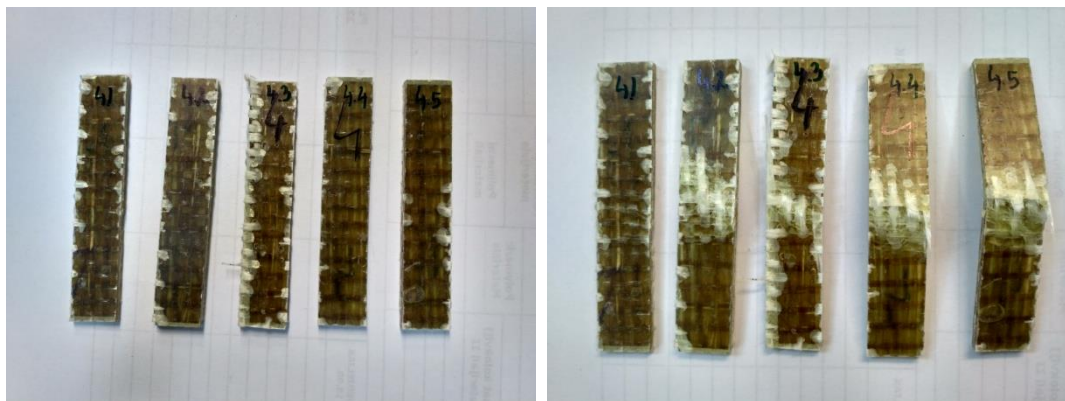
Tablica 43. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak S1L1_I.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [Mpa]	R_{ms} [Mpa]	F_{max} [N]
1	15,30	3,40	47,00	50	2442,42	142,48	336
2	15,22	2,96	48,74	50	3858,74	185,60	330
3	15,26	3,02	44,69	50	3322,65	169,21	314
4	15,15	3,08	53,00	50	3741,63	166,99	320
5	15,21	3,07	47,18	50	3350,15	178,93	342
\bar{x}	15,23	3,11	48,12	50	3343,12	168,64	328,4
st. dev.	0,056	0,171	3,086	0	555,971	16,439	11,437

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, $\Delta F/\Delta f$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, E_s - savojni modul elastičnosti, R_{ms} -savojna čvrstoća, F_{max} - maksimalna sila, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.2.4. Kompozitna ploča S1L1_II.

Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće prikazani su na slici 47. Uzorke smo ispitivali s lica.



Slika 47. Epruvete kompozitne ploče S1L1_II. za ispitivanje savojne čvrstoće prije i poslije ispitivanja

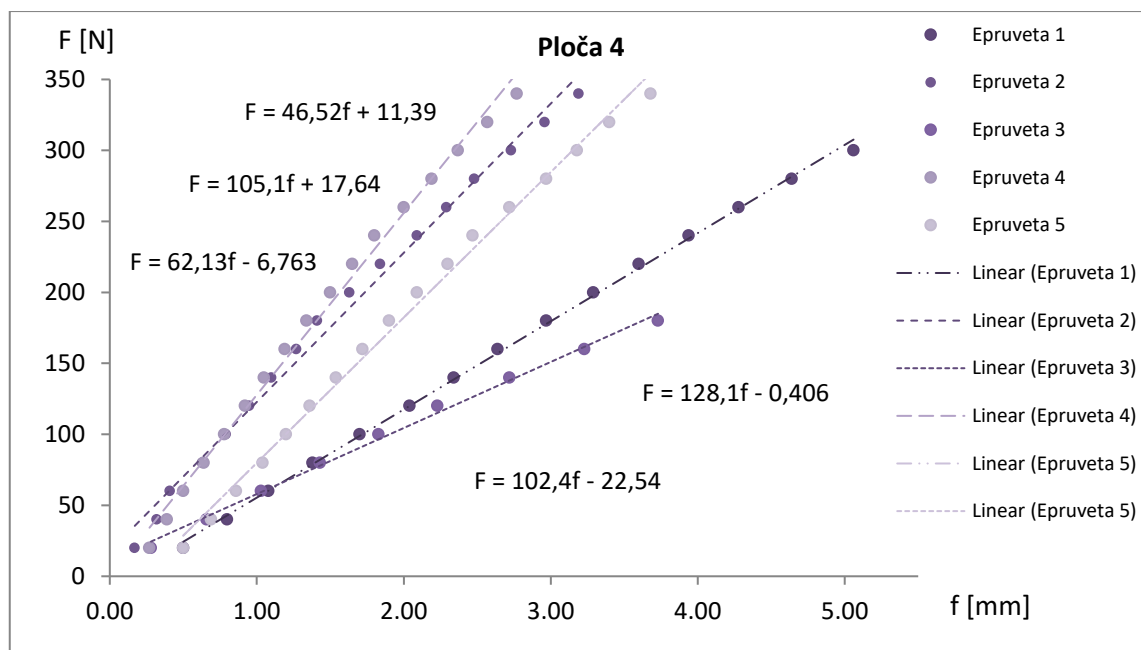
U tablici 44 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za kompozitnu ploču S1L1_II. Zabilježeni su progibi za interval od 20 do 3400 N, a bilježena je vrijednost progiba svakih 20N.

Tablica 44. Progibi pri opterećenjima za uzorak S1L1_I.

	Redni broj epruvete				
	1	2	3	4	5
\bar{s} [mm]	15,07	15,61	15,32	15,38	15,18
d [mm]	2,95	3,28	3,13	3,47	3,61
S_0 [mm ²]	44,46	51,20	47,95	53,37	54,80
F [N]	f [mm]				
20	0,50	0,17	0,28	0,27	0,50
40	0,80	0,32	0,66	0,39	0,69
60	1,08	0,41	1,03	0,50	0,86
80	1,38	0,63	1,43	0,64	1,04
100	1,70	0,79	1,83	0,78	1,20
120	2,04	0,95	2,23	0,92	1,36
140	2,34	1,10	2,72	1,05	1,54
160	2,64	1,27	3,23	1,19	1,72
180	2,97	1,41	3,73	1,34	1,90
200	3,29	1,63		1,50	2,09
220	3,60	1,84		1,65	2,30
240	3,94	2,09		1,80	2,47
260	4,28	2,29		2,00	2,72
280	4,64	2,48		2,19	2,97
300	5,06	2,73		2,37	3,18
320		2,96		2,57	3,40
340		3,19		2,77	3,68
F_{max} [N]	300	426	210	444	388
R_{ms} [MPa]	178,43	197,86	109,14	187,01	152,98
L [mm]	52				

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, S_0 -površina poprečnog presjeka, f - progib, F -sila, F_{max} - maksimalna sila, R_{ms} - savojna čvrstoća, L - razmak između stezaljki

Bilo je potrebno nacrtati dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju kako bi se mogao odrediti nagib pravca potreban za izračun savojnog modula (sl. 48). Jednadžbe pravaca navedene su u tablici 45 .



Slika 48. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_II.

Tablica 45. Jednadžbe pravca iz dijagrama ovisnosti produljenja o opterećenju za S1L1_II.

Epruveta	Jednadžba pravca
1	$F = 62,13f - 6,763$
2	$F = 105,1f + 17,64$
3	$F = 46,52f + 11,39$
4	$F = 128,1f - 0,406$
5	$F = 102,4f - 22,54$

U tablici 46 prikazani su rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.

Tablica 46. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak S1L1_I.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [Mpa]	R_{ms} [Mpa]	F_{max} [N]
1	15,07	2,95	62,13	52	5645,11	178,43	300
2	15,61	3,28	105,10	52	6707,00	197,86	426
3	15,32	3,13	46,52	52	3480,95	109,14	210
4	15,38	3,47	128,10	52	7007,36	187,01	444
5	15,18	3,61	102,51	52	5045,72	152,98	388
\bar{x}	15,31	3,29	88,87	52	5577,23	165,08	353,60
st. dev.	0,206	0,263	33,530	0	1414,492	35,388	97,585

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, $\Delta F/\Delta f$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, E_s - savojni modul elastičnosti, R_{ms} -savojna čvrstoća, F_{max} - maksimalna sila, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

U tablici 47 dani su skupni rezultati ispitivanja savojne čvrstoće četiri kompozitne ploče odabrane za karakterizaciju.

Tablica 47. Skupni rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [Mpa]	R_{ms} [Mpa]	F_{max} [N]
S1_IV.	15,3	2,74	51,17	44	3351,07	197,34	348
st. dev.	0,108	0,187	15,745	-	438,896	18,443	72,512
V [%]	0,706	6,825	30,770	-	13,097	9,346	20,837
L1_I.	15,32	4,37	49,9	70	3334,66	95,71	268
st. dev.	0,141	0,323	8,580	-	215,140	7,544	46,712
V [%]	0,920	7,391	17,194	-	6,452	7,882	17,430
S1L1_I.	15,23	3,11	48,12	50	3343,12	168,64	328,4
st. dev.	0,056	0,171	3,086	-	555,971	16,439	11,437
V [%]	0,368	5,498	6,413	-	16,630	9,748	3,483
S1L1_II.	15,31	3,29	88,87	52	5577,23	165,08	353,6
st. dev.	0,206	0,263	33,530	-	1414,492	35,388	97,585
V [%]	1,346	7,994	37,729	-	25,362	21,437	27,598

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, $\Delta F/\Delta f$ - nagib pravca, L - razmak između stezaljki, E_s - savojni modul elastičnosti, R_{ms} -savojna čvrstoća, F_{max} - maksimalna sila, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija, V- koeficijent varijacije

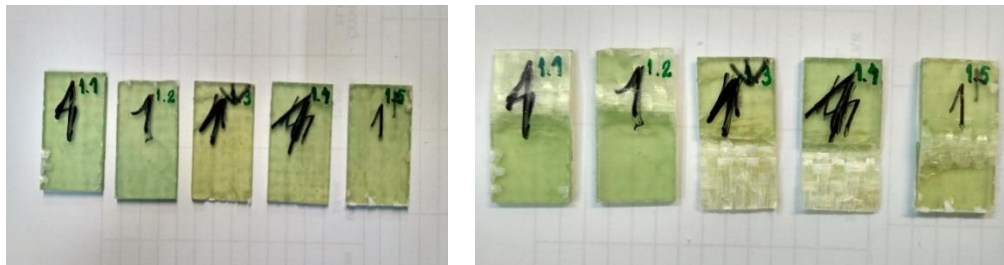
Iz rezultata prikazanih u tablici 47, a uspoređujući kompozitne ploče ojačane s dva sloja tkanih ojačala (S1_IV., L1_I i S1L1_I.) i hibridnog kompozita ojačanog s dva sloja staklenog i jednim slojem lanenog ojačala (S1L1_II.) je vidljivo da:

- je kod svih ispitivanih ploča ojačanih s dva sloja ojačala (S1_IV., L1_I i S1L1_I.) utvrđena gotovo jednaka vrijednost savojnog modula elastičnosti, dok najveći savojni modul pokazuje kompozit ojačan s dva sloja staklenih i jednim slojem lanenog ojačala (S1L1_II.).
- je kompozit ojačan s dva sloja lanenog ojačala (L1_I.) pokazao manje vrijednosti savojne čvrstoće i maksimalne zabilježene sile pri savojnom opterećivanju u odnosu na preostale kompozitne ploče (kod kojih su utvrđene vrijednosti veoma bliske),
- su utvrđene vrijednosti koeficijenta varijacije relativno niske, a najviše su kod kompozitne ploče ojačane s tri sloja ojačala (S1L1_II.).

4.2.2.3. Međuslojna čvrstoća

4.2.2.3.1. Kompozitna ploča S1_IV.

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazane su na slici 49.



Slika 49. Epruvete kompozitne ploče S1_IV. prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće

Brzina opterećivanja epruveti postavljena je na 5 mm/min, a mjerno područje je 2400N. Razmak između oslonaca za epruvete kompozitne ploče S1_IV. iznosi 14 mm, a epruvete smo ispitivane s naličja. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 48.

Tablica 48. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za kompozitnu ploču S1_IV.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	τ [Mpa]
1	20,69	2,92	1550	19,24
2	20,61	2,92	1160	14,46
3	20,51	2,60	1030	14,49
4	20,58	2,77	1280	16,84
5	20,43	2,69	1375	18,76
\bar{x}	20,56	2,78	1279	16,76
st. dev	0,099	0,141	199,261	2,273

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, F_{max} - maksimalna sila, τ -međuslojna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.3.2. Kompozitna ploča L1_I.

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazane su na slici 50.



Slika 50. Epruvete kompozitne ploče L1_I. prije i poslije ispitivanja međuslojne tvrdoće

Brzina opterećivanja epruveti postavljena je na 5 mm/min, a mjerno područje je 2400N. Razmak između oslonaca za epruvete kompozitne ploče L1_I. iznosi 20 mm, a epruvete smo ispitivane s naličja. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 49.

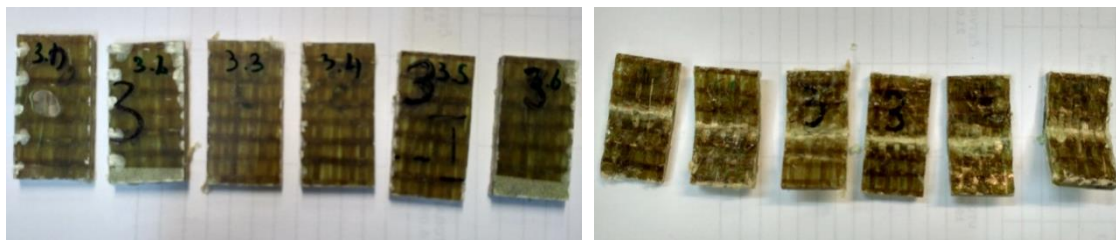
Tablica 49. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za kompozitnu ploču L1_I.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	τ [Mpa]
1	20,46	4,65	1460	11,51
2	20,53	4,17	1060	9,29
3	20,85	3,52	690	7,05
4	20,68	4,58	1460	11,56
5	20,65	3,79	780	7,47
\bar{x}	20,63	4,14	1090	9,38
st. dev	0,150	0,490	364,280	2,142

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, F_{max} - maksimalna sila, τ -međuslojna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.3.3. Kompozitna ploča S1L1_I.

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazane su na slici 51.



Slika 51. Epruvete kompozitne ploče S1L1_I. prije i poslije ispitivanja međuslojne tvrdoće

Brzina opterećivanja epruveti postavljena je na 5 mm/min, a mjerno područje je 2400N. Razmak između oslonaca za epruvete kompozitne ploče S1L1_I. iznosi 18 mm, a epruvete smo ispitivane s lica tako da staklena vlakna podnose više naprezanja. Epruveta 3 ima veliki mjehurić zraka koji se treba uzeti u razmatranje prilikom komentiranja rezultata. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 50.

Tablica 50. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za kompozitnu ploču S1L1_I.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	τ [Mpa]
1	20,67	3,54	800	8,20
2	20,91	3,76	1260	12,02
3	20,50	3,23	1220	13,82
4	20,56	3,29	1200	13,31
5	20,56	3,75	1250	12,16
6	20,48	4,00	1430	13,09
\bar{x}	20,61	3,60	1193,33	12,10
st. dev	0,160	0,298	209,348	2,030

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, F_{max} - maksimalna sila, τ -međuslojna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

4.2.2.3.4. Kompozitna ploča S1L1_II.

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazane su na slici 52.



Slika 52. Epruvete kompozitne ploče S1L1_II. prije i poslije ispitivanja međuslojne tvrdooće

Brzina opterećivanja epruveti postavljena je na 5 mm/min, a mjerno područje je 2400N. Razmak između oslonaca za epruvete kompozitne ploče S1L1_II. iznosi 18 mm, a epruvete smo ispitivane s lica. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 51.

Tablica 51. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za kompozitnu ploču S1L1_II.

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	τ [Mpa]
1	20,77	3,47	1260	13,11
2	20,92	3,67	1380	13,48
3	20,63	3,65	1070	10,66
4	20,55	3,46	1130	11,92
5	20,42	3,79	1270	12,31
\bar{x}	20,66	3,61	1222,00	12,30
st. dev	0,194	0,141	122,760	1,106

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, F_{max} - maksimalna sila, τ -međuslojna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

U tablici 52 dani su skupni rezultat ispitivanja međuslojne čvrstoće za četiri kompozitne ploče određene za karakterizaciju.

Tablica 52. Skupni rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće

Epruveta	\bar{s} [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	τ [Mpa]
S1_IV.	20,56	2,78	1279	16,76
st. dev.	0,099	0,141	199,261	2,273
V [%]	0,482	5,072	15,579	13,562
L1_I.	20,63	4,14	1090	9,38
st. dev.	0,15	0,49	364,28	2,142
V [%]	0,727	11,836	33,420	22,836
S1L1_I.	20,61	3,6	1193	12,1
st. dev.	0,16	0,298	209,348	2,03
V [%]	0,776	8,278	17,548	16,777
S1L1_II.	20,66	3,61	1222	12,3
st. dev.	0,194	0,141	122,76	1,106
V [%]	0,939	3,906	10,046	8,992

gdje je: \bar{s} - širina epruvete, d - debljina epruvete, F_{max} - maksimalna sila, τ -međuslojna čvrstoća, \bar{x} - aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija, V- koeficijent varijacije

Iz rezultata prikazanih u tablici 52 je vidljivo da kompozit ojačan s dva sloja tkanog ojačala iz staklenih vlakana (S1_IV.) pokazuje najveću međuslojnu čvrstoću i prije loma može izdržati veće opterećenje u odnosu na ostale uzorke. No, iako biokompozitna ploča 2 (L1_I.) ojačana s dva sloja tkanog lanenog ojačala pokazuje malo niže vrijednosti vlačne čvrstoće i maksimalne sile, kod hibridnih kompozitnih ploča (S1L1_I. i S1L1_II.) utvrđene su usporedive vrijednosti. Kako je međuslojna smična čvrstoća mjerilo kvalitete granične površine i ovisi o čvrstoći prijanjanja vlakana ojačala i matrice te kvaliteti adhezije, za pretpostaviti je da primijenjeni postupak pripreme kompozitnih ploča uz primjenu hidrofbne matrice rezultira kompozitom boljih karakteristika u slučaju ojačanja staklenim vlaknima. Navedeno potvrđuje i najviši utvrđeni koeficijent varijacije ispitivanog svojstva u kompozitne ploče ojačane dvama sloja lanenog ojačala (L1_I.).

4.2.2.4. Tvrdća

Tvrdoću možemo odrediti jedino kompozitnoj ploči L1_I. jer je jedina deblja od 4 mm. Da mjerimo ostale kompozitne ploče na rezultat bi utjecala čelična podloga koja je tvrđa od kompozita. Rješenje bi bilo da se tanje kompozitne ploče stave u 2 sloja, no problem kod naših ploča je što su hrapave pa se zapravo ne bi mjerila tvrdoća, odnosno

utiskivanje kuglice nego savijanje između pregiba. Kompozitna ploča L1_I. je također hrapava pa prilikom tumačenja rezultata ovu informaciju valja uzeti u obzir. Ako bi mjerili glatku stranu onda bi mjerili savijanje ploče, a ako mjerimo grublju stranu uvijek možemo kuglicu staviti na neka viša ili niža mjesta pa rezultati mogu varirati.

4.2.2.4.1. Kompozitna ploča L1_I.

Dubine prodiranja kuglice i tvrdoće nakon 10, 30 i 60 sekundi za kompozitnu ploču L1_I. prikazane su u tablici 53. Promjer kuglice za utiskivanje je 5 mm, a sila utiskivanja iznosi 13,5kP, odnosno 132N. Pri izračunu tvrdoće na dubine prodiranja primijenjen je korekcijski faktor. To je vrijednost za koju se mora umanjiti izmjerena vrijednost zbog deformacije uređaja, a graf vrijednosti dolazi od proizvođača uređaja. Korelacijski faktor za primijenjenu silu od 132N je 0,05.

Tablica 53. Rezultati mjerenja tvrdoće za kompozitnu ploču L1_I.

Očitanje	<i>h</i> (10 s)	<i>H</i> (10s)	<i>h</i> (30 s)	<i>H</i> (30 s)	<i>h</i> (60 s)	<i>H</i> (60 s)
1	0,150	84,67	0,155	80,64	0,170	70,56
2	0,145	89,13	0,150	84,67	0,150	84,67
3	0,145	89,13	0,150	84,67	0,155	80,64
4	0,180	65,13	0,195	58,39	0,120	120,96
5	0,320	31,36	0,320	31,36	0,325	30,79
6	0,345	28,70	0,350	28,22	0,350	28,22
7	0,220	49,81	0,230	47,04	0,240	44,56
8	0,150	84,67	0,155	80,64	0,160	76,97
9	0,160	76,97	0,185	62,72	0,190	60,48
10	0,175	67,74	0,185	62,72	0,195	58,39
<i>x</i>		66,73		62,11		65,63
st.dev		22,947		21,188		27,765

gdje je: *h*- dubina prodiranja kuglice, *H*-tvrdoća, *x*- aritmetička sredina, st.dev.- standardna devijacija

Analizom rezultata tvrdoće kompozitne ploče ojačane s dva sloja lanenog ojačala utvrđeno je da:

- se s povećanjem vremena opterećivanja bilježe niže vrijednosti tvrdoće kompozitnog materijala,
- je nakon opterećivanja materijala u vremenu od 60 s nije utvrđeno značajno smanjenje tvrdoće materijala,

- da su u usporedbi s prethodnim istraživanjima [24] za ispitivanu kombinaciju materijala utvrđeni vrlo slični rezultati.

5. Zaključak

U skladu s ciljevima rada i provedbom planiranih analiza možemo zaključiti da:

- je uhodan postupak izrade kompozitnih ploča ojačanih staklenim i lanenim ojačalima postupkom ručnog laminiranja u laboratorijskim uvjetima,
- je provedena karakterizacija ojačala primijenjenih u izradi kompozitnih ploča;
- je provedbom karakterizacije dobivenih kompozitnih ploča ispitivanjem masenog i volumnog udjela vlakana, te mehaničkih svojstava- vlačne čvrstoće, savojne čvrstoće, međuslojne čvrstoće i tvrdoće te usporedbom dobivenih kompozitnih ploča utvrđeno da:

- kompozit ojačan s dva komada tkanog lanenog ojačala pokazuje vrlo dobru otpornost na vlačna opterećenja i visoke vrijednosti maksimalne sile u usporedbi s kompozitnom pločom ojačanom s dva komada tkanog staklenog ojačala, te također ima veliku tvrdoću utvrđenu ispitivanjem uzoraka. Nasuprot tome, kompozitna ploča ojačala s dva komada staklenih ojačala pokazuje značajno bolja savojna svojstva i međuslojnu čvrstoću. Hibridne ploče pokazuju odlična mehanička svojstva ispitivana u ovom radu, a vrijednosti su usporedive s kompozitnom pločom ojačanom s 2 komada tkanih staklenih ojačala.

- se dizajnom kompozita može značajno utjecati na svojstva samih kompozitnih ploča što je posebno vidljivo kod ispitivanja hibridnih kompozitnih ploča. Izvrsna mehanička svojstva moguće je postići uz odgovarajuću vrstu, raspored i broj komada ojačala.

- lanena ojačala uz odgovarajući dizajn kompozita mogu potpuno ili djelomično zamijeniti staklena ojačala u polimernim kompozitnim materijalima.

6. Literatura

1. Vujasinović, E.: Vlaknima ojačani kompoziti: interna skripta iz kolegija Vlaknima ojačani kompoziti, TTF, Zagreb, ak.god. 2017./2018.
2. Marić, G.: Materijali II: interna skripta iz kolegija Materijali II, FSB, Zagreb, ak. god. 2012./2013.
3. Milton, G.W.: The Theory of Composites, Cambridge University Press, Cambridge 2004
4. Antić, M.: Kompozitni materijali, Kontrol-Inspekt, Beograd 2016.
5.: Metalni kompoziti, *dostupno na:* [https://bib.irb.hr/datoteka/189027.metalni .pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf), *pristupljeno:* 10_07_2018
6.: Postupci proizvodnje kompozita, *dostupno na:* https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1431694359-0_ntmpmckompoziti_15_1.pdf, *pristupljeno:* 10_07_2018
7.: Formula 1, *dostupno na:* <https://autoweek.com/article/formula-one/aston-martin-partners-red-bull-f1-rumors-engine-deal-inevitable>, *pristupljeno:* 11_07_2018
8.: Cities of the future, *dostupno na:* <https://howwegettonext.com/how-cutting-edge-materials-will-change-the-look-of-the-cities-of-the-future-ab5408b4a197>, *pristupljeno:* 11_07_2018
9.: Sagelboot, *dostupno na:* [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Segelboot_Bodensee_Mainau_\(Foto_Hilarmont\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Segelboot_Bodensee_Mainau_(Foto_Hilarmont).JPG), *pristupljeno:* 11_07_2018
10.: Lightweight composite helmets, *dostupno na:* http://www.sstmotorsports.com/Junior_Lightweight_Composite_Helmets_p/sst-jrfb.htm, *pristupljeno:* 11_07_2018
11.: B-2 bomber, *dostupno na:* <https://www.businessinsider.com/b-2-spirit-stealth-bomber-what-is-feared-2018-2>, *pristupljeno:* 11_07_2018
12.: Jahta, *dostupno na:* <http://www.luxmagazine.hr/u-pokretu/nautika/nova-jahta-heesen-odogradili-C5%A1ta-ann-g>, *pristupljeno:* 11_07_2018

13. ...: E-73 composite, *dostupno na:* <https://escamillabats.com/shop/e-73-composite/>, *pristupljeno:* 11_07_2018
14. ...: Atlas Composites, *dostupno na:* <http://www.atlascomposites.com/>, *pristupljeno:* 11_07_2018
15. Čunko, R.; Andrassy, M.; Vlakna, Zrinski d.d., Zagreb 2005.
16. Tomljenović, A.; Marić, G.: Flax fibers- candidate for replacment of E-glass fibers in composites for structural application, Proceedings of 2nd International Conference on Natural Fibres/ICNF2015 From Nature to Market, Sao Miguel Azore, Portugal, 27 - 29.04.2015., pp 1-5
17. Tomljenović, A.; Marić, G.; Vojnović, I.; Brunšek, R.; Preparation and characterization of woven roving flax fibre reinforced unsaturated polyester bio-composites, Proceedings of 7th International textile, clothing & design conference, Dubrovnik 2014, 05-08.10.2014., pp 104-109
18. Marić, G.; Vojnović, I.; Tomljenović, A.: Zamjena E-staklenih vlakana s lanenim vlaknima u kompozitima s poliesterskom matricom: usporedba mehaničkih svojstava, Conference Proceedings of MATRIB 2014 Materials, trybolology, recycling , Vela Luka 26.-28.06.2014., str. 331-342
19. ...: Tekstilna vlakna, *dostupno na:* <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=65055>, *pristupljeno:* 15_07_2018
20. ...: Manufacturing atage of glass fiber, *dostupno na:* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Manufacturing_stage_of_glass_fiber.GIF, *pristupljeno:* 15_07_2018
21. ...: Fiberglass spinner, *dostupno na:* <https://www.yokogawa.com/us/library/resources/application-notes/fiberglass-spinner/>, *pristupljeno:* 15_07_2018
22. ...: Is glass a polymer, *dostupno na:* <http://www.pslc.ws/macrog/glass.htm>, *pristupljeno:* 15_07_2018
23. ...: European Linen and Hemp, *dostupno na:* <http://www.mastersoflinen.com> *pristupljeno:* 20_07_2018

24. Krstić, M.: Izrada i karakterizacija biokompozitnih materijala s ojačalom od lanenih vlakana, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb 2015. (mentor: izv.prof.dr.sc. Antoneta Tomljenović)
25. Vidoš, J.: Vrednovanje kvalitete adhezije između matrice i celuloznih ojačala u biokompozitnim materijalima, Rektorova nagrada za ak.god. 2014./2015.(mentor: izv.prof.dr.sc. Antoneta Tomljenović)
26. Tomljenović, A.; Rusak, K.: Flax and Hemp Fibre Reinforcements for Polymer Composite Materials, Zbornik radova 8.znanstveno-stručnog savjetovanja Tekstilna znanost i gospodarstvo, Zagreb, 26.siječnja 2015., pp 102-107
27. Kukić, I.: Ispitivanje tekstilnih ojačala za polimerne kompozitne materijale, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb 2017. (mentor: izv.prof.dr.sc. Antoneta Tomljenović)
28. HRN EN ISO 5084:2003 Tekstil-Određivanje debljine tekstila i tekstilnih proizvoda
29. HRN ISO 3801:2003 Tekstil- Tkanine- Određivanje mase po jedinici duljine i mase po jedinici površine
30. HRN EN 1049-2:2003 Tekstil- Tkanine- Konstrukcija- Metode analize- 2.dio: Određivanje broja niti na jedinici duljine
31. EN ISO 527-4:2008 Plastika -- Određivanje rasteznih svojstava - 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima
32. Landek, D.: Materijali i proizvodni postupci: autorizirana predavanja iz kolegija Materijali, FSB, Zagreb, ak. god. 2012./2013.
33. Franz, M.; Kovačiček, F.; Novosel, M.; Indof, J.: Inženjerski priručnik ip4, 1. Svezak, ŠK, Zagreb 1998.
34. Vukušić, I.: Usporedba mehaničkih svojstava kompozita ojačanih prirodnim i staklenim vlaknima, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet storjarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014. (mentor: izv.prof.dr.sc. Gojko Marić)

35.: Ekstenziometar, *dostupno na:*
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17457>, *pristupljeno: 16_07_2018*
36. HRN EN ISO 14125:2005/A1:2011 Plastični kompoziti ojačani vlaknima -
Određivanje savojnih svojstava
37. HRN EN ISO 14130:2005 Plastični kompoziti ojačani vlaknima – Određivanje
prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede
38. HRN EN ISO 2039-1:2005 Plastika - Određivanje tvrdoće - 1. Dio: Metoda
utiskivanja kuglice